

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO
2. **TÍTULO:** Evaluación del efecto, en la respuesta en frecuencia, al implementar material absorbente al interior de bocinas cónicas y exponenciales, desde 500 Hz hasta 5 kHz.
3. **AUTORES:** Luis Fernando Chaparro Colorado y Juan Felipe Cortés Guerrero.
4. **LUGAR:** Bogotá, D.C.
5. **FECHA:** Julio del 2018.
6. **PALABRAS CLAVES:** respuesta en frecuencia, bocina, material absorbente, coeficiente de absorción.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** se plantea el uso del material absorbente con el propósito de reducir el rizado de la respuesta en frecuencia (RF) en una bocina cónica y dos bocinas exponenciales (Salmon y rectangular). Se caracteriza, compara y se evalúa el efecto que producen, en las RF, cuatro materiales porosos a través de la estadística descriptiva y el análisis de la varianza ANOVA, desde 500 Hz hasta 5 kHz. los pasos realizados, durante el desarrollo ingenieril, se destacan los siguientes: la simulación con el método de los elementos finitos FEM para modelar el campo acústico al interior de las bocinas; la aplicación del análisis de componentes principales ACP con el fin de determinar la relación entre la RF simulada y medida con tres configuraciones experimentales.
8. **LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Diseño de sistemas de sonido.
9. **METODOLOGÍA:** es un estudio con un enfoque cuantitativo, de tipo experimental.
10. **CONCLUSIONES:**
 - Las respuestas en frecuencia se caracterizaron a través de la desviación estándar DE , el rango R y el coeficiente de asimetría γ . En general, los resultados de estas medidas indican que las RF se favorecieron con la implementación del material absorbente, destacándose la “acustifibra” en la bocina exponencial rectangular ($DE = 0.229 Pa, \gamma = 0.78, R = 1.8 Pa$).
 - Se calcularon las diferencias ($\Delta DE, \Delta \gamma, \Delta R$) obtenidas en las RF medidas con y sin material absorbente. En general, se registran diferencias negativas en ΔDE y ΔR , demostrando que el uso del material absorbente reduce la fluctuación de la RF.
 - El coeficiente de correlación r , calculado entre las diferencias ΔDE , Δp y ΔR , son significativamente positivos con los materiales porosos ubicados en la boca. La más significativa ($r = 0.99$ en Δp), se obtuvo con la bocina exponencial rectangular. Se deduce que el comportamiento de la velocidad de partícula v influye en esta relación.
 - A través del ANOVA, se demuestra que la implementación del material absorbente produce un efecto significativo en la RF de las bocinas, excepto con el *Lowsound* en la bocina cónica [$F(2,480) = 0.55, P = 0.578$] y en la bocina exponencial rectangular [$F(2,480) = 0.64, P = 0.529$].

Evaluación del efecto, en la respuesta en frecuencia, al implementar material absorbente al interior de bocinas cónicas y exponenciales, desde 500 Hz hasta 5 kHz.

**Luis Fernando Chaparro Colorado
Juan Felipe Cortés Guerrero**

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá

Facultad de ingeniería

Programa de ingeniería de sonido

Bogotá, Colombia

2018

Evaluación del efecto, en la respuesta en frecuencia, al implementar material absorbente al interior de bocinas cónicas y exponenciales, desde 500 Hz hasta 5 kHz.

Luis Fernando Chaparro Colorado
Juan Felipe Cortés Guerrero

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero de sonido:

Título y nombre del director(a)
Ing. Manuel Fernando Torres Cifuentes

Línea de Investigación:
Diseño de sistemas de sonido

Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería de Sonido
Bogotá, Colombia
2018

Agradecimientos

A mis padres, Mariela y Fernando, por su ayuda y su apoyo durante el tiempo comprendido para la realización de este trabajo. A mi compañero de trabajo, Juan Felipe, por su dedicación, aporte, responsabilidad y amistad.

Luis Chaparro

A mi mamá y a mi abuela, Luz y Virginia, por todo el esfuerzo que hicieron para que yo cumpliera mis metas. Finalmente, gracias a mi compañero de tesis, Luis Fernando, por su gran trabajo, responsabilidad, además de ser un gran amigo.

Juan Felipe Cortés

Al ingeniero Manuel Fernando Torres, quien concibió y asesoró esta idea. Además, por creer en nuestro trabajo al habernos propuesto la investigación con confianza y seguridad. Al ingeniero Oscar Acosta, por su tiempo y su gran aporte en la simulación con el método de elementos finitos y el análisis estadístico ACP. Al ingeniero Shimmy García, por habernos guiado en las primeras etapas del desarrollo de la investigación. A los auxiliares de laboratorios, Juan, Daniel y María Paula, por haber desempeñado su labor siempre con su buena intención de ayudarnos, en especial, durante el largo proceso de las mediciones.

Luis y Juan

Resumen

La bocina es un sistema que aumenta la potencia acústica de un radiador acústico, sin incrementar la potencia eléctrica aplicada. Su Respuesta en Frecuencia (RF) presenta irregularidades causadas por ondas estacionarias, generadas en las frecuencias con longitudes de onda mayores al diámetro de la abertura de la boca. Para que las bocinas reproduzcan frecuencias medias – altas sin fluctuaciones, deben tener dimensiones grandes y de difícil implementación. Se plantea el uso de material absorbente para reducir dicha irregularidad. En esta investigación se caracterizó, comparó y evaluó la RF de una bocina exponencial de Salmon, una exponencial rectangular y una cónica, con y sin material absorbente implementado, desde 500 Hz hasta 5 kHz. Se utilizaron cuatro materiales y se calculó la correlación entre el coeficiente de absorción α y las RF. Se estableció tres ubicaciones de estos materiales, según los máximos de la velocidad de partícula al interior de la bocina. La irregularidad varía con el material y su ubicación, reduciéndose significativamente en algunos casos. La desviación DE y el rango R más favorable se observa con la “acustifibra” en la boca de la bocina exponencial rectangular ($DE = 0.229 Pa, R = 1.8 Pa$), donde se reduce nivel de presión sonora ΔSPL promedio ($-14.69 dB$). Únicamente se obtuvo una relación directa con el α y las diferencias de presión sonora Δp y de rango ΔR , debido al comportamiento de la velocidad de partícula. Con el método estadístico del análisis de la varianza ANOVA, se demuestra que los materiales producen un efecto significativo en la RF.

Palabras clave: Respuesta en frecuencia, Bocina, Material absorbente, Coeficiente de absorción.

Abstract

Horns are a sound systems that increases the acoustic power of a loudspeaker, without raising the electric power applied. Its (FR) Frequency Response shows a nonlinear behavior caused by stationary waves, generated in frequencies with wavelengths greater than the mouth diameter. To reproduce medium – high frequencies without fluctuations, the horn must have large dimensions, being difficult to implement. The use of absorbent material is proposed to reduce this fluctuation. It was characterized, compared and assessed the frequency response of a Salmon exponential horn, a rectangular and a conical, implemented with and without absorbent material, from 500 Hz to 5 kHz. Four absorbent materials were used and the correlation between the absorption coefficient α and the RF was calculated. Three locations of these materials were established, according to the maximum particle velocity viewed inside of the horns. The fluctuation changes with the material and its location where it significantly decreased in some cases. The most favorable deviation DE and range R is produced with “acustifibra” in the mouth of the exponential rectangular horn ($DE = 0.229 Pa, R = 1.8 Pa$), measure where the sound pressure level ΔSPL is reduced ($-14.69 dB$). It was exclusively obtained a relationship directly proportional with α and the differences of sound pressure Δp and range ΔR , caused by particle velocity behavior. With the statistical method of one-way Analysis of Variance (ANOVA), it is shown that implemented materials produce a significant effect on RF.

Keywords: Frequency response, Horn, Absorbent material, Absorption coefficient.

Contenido

Pág.

1. Capítulo I. Problema de la investigación	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos	5
1.2.1 Objetivo general	5
1.2.2 Objetivos específicos	5
1.3 Justificación.....	5
2. Capítulo II. Marco de referencia	7
2.1 Antecedentes del problema	7
2.2 Marco conceptual	10
2.2.1 Respuesta en frecuencia	10
2.2.2 Sistema no-lineal	10
2.2.3 Bocina	11
2.2.4 Absorción del sonido.....	22
2.2.5 Métodos numéricos	25
2.2.6 Estadística	31
3. Capítulo III. Diseño metodológico	35
3.1 Tipo y enfoque de investigación	35
3.2 Recopilación de datos	36
3.3 Variables o categorías de análisis.....	36
4. Capítulo IV. Desarrollo ingenieril	39
4.1 Respuesta en frecuencia RF del <i>driver</i> de compresión	39
4.1.1 Medición y caracterización de la respuesta en frecuencia del <i>driver</i> de compresión. .	40
4.1.2 Ajuste de la RF del <i>driver</i> de compresión.....	42
4.2 Diseño de las bocinas	46
4.2.1 Cálculos de las medidas y dimensiones de las bocinas	47
4.2.2 Predicción de la impedancia acústica de la garganta.	49
4.3 Elección del material absorbente.....	51
4.4 Simulación acústica con el método de los elementos finitos	52
4.4.1 Modelación geométrica de las bocinas en dos y tres dimensiones.....	53
4.4.2 Desarrollo de las mallas en los modelos geométricos de las bocinas.	56
4.4.3 Pre – procesamiento de la simulación numérica	58
4.4.4 Post – procesamiento de la simulación numérica.....	62

XIV Evaluación del efecto, en la respuesta en frecuencia, al implementar material absorbente al interior de bocinas cónicas y exponenciales, desde 500 Hz hasta 5 kHz.

4.5	Impresión en 3D de las bocinas	63
4.6	Medición de la respuesta en frecuencia de las bocinas sin material absorbente.	65
4.7	Implementación del material absorbente al interior de las bocinas.	67
4.8	Medición de la respuesta en frecuencia de las bocinas con los materiales absorbentes...	68
5.	Capítulo V. Pruebas y resultados	69
5.1	Pruebas	69
5.2	Resultados	69
6.	Capítulo VI. Discusión.....	77
6.1	Caracterización de las respuestas en frecuencia medidas, con y sin material absorbente. 77	
6.1.1	Bocina exponencial de Salmon	78
6.1.2	Bocina exponencial rectangular	80
6.1.3	Bocina cónica.....	81
6.2	Diferencias entre las respuestas en frecuencia medidas, con y sin material absorbente. .	82
6.2.1	Bocina exponencial de Salmon	83
6.2.2	Bocina exponencial rectangular	84
6.2.3	Bocina cónica.....	86
6.3	Relación entre el comportamiento de la respuesta en frecuencia y el coeficiente de absorción de los materiales absorbentes.	87
6.3.1	Bocina exponencial de Salmon	88
6.3.2	Bocina exponencial rectangular	90
6.3.3	Bocina cónica.....	91
6.4	Evaluación del efecto que produce el material absorbente en la respuesta en frecuencia de las bocinas.	92
6.4.1	Aplicación del análisis de la varianza ANOVA.....	93
6.4.2	Interpretación de los resultados.....	98
7.	Capítulo VII. Conclusiones y recomendaciones.	103
7.1	Conclusiones	103
7.2	Recomendaciones.....	105
	Referencias.....	227

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Línea del tiempo de los antecedentes de la problemática.	9
Figura 2-2: Ilustración de una bocina exponencial de Salmon.	12
Figura 2-3: Bocina de patrón directivo constante.	16
Figura 2-4: Impedancia acústica teórica de una bocina exponencial.	19
Figura 2-5: Ilustración de una bocina cónica.	19
Figura 2-6: Impedancia acústica teórica de una bocina cónica.	20
Figura 2-7: Ilustración de una bocina radial.	21
Figura 2-8: Ilustración de una bocina rectangular exponencial.	22
Figura 2-9: Ejemplo de la simulación acústica, al interior de una turbina, realizada por el método de los elementos finitos FEM.	26
Figura 2-10: Topología y orden de interpolación de los elementos.	27
Figura 2-11: Características de los elementos infinitos IE en el software de simulación ACTRAN VI.	28
Figura 3-1: Relación de las variables dependientes e independientes del estudio experimental.	37
Figura 4-1: Diagrama de conexión de los equipos utilizados en la medición de la RF del driver de compresión.	41
Figura 4-2: Respuesta en frecuencia medida del driver de compresión D3240TI.	44
Figura 4-3: Respuesta en frecuencia medida con el driver de compresión D3240TI, con los tres micrófonos utilizados en la investigación.	45
Figura 4-4: Coeficiente de variación entre las RF del <i>driver</i> de compresión D3240TI, obtenidas con las repeticiones y con los micrófonos.	46
Figura 4-5: Interfaz gráfica del programa, desarrollado en MATLAB 2017b, para efectuar el diseño de las bocinas.	47
Figura 4-6: Ilustración de la impedancia acústica de la garganta ZT , de la bocina cónica y exponencial, desde 500 Hz hasta 5000 Hz.	50
Figura 4-7: Muestras de los cuatro materiales absorbentes implementados en las bocinas.	52

Figura 4-8: Coeficiente de absorción y densidad de los cuatro materiales porosos utilizados en la investigación.	52
Figura 4-9: Modelos geométricos de las bocinas, correspondientes con el volumen de aire ocupado al interior.	54
Figura 4-10: Modelos geométricos de las bocinas utilizados en la simulación numérica.	55
Figura 4-11: Dominios asignados en el modelo de tres dimensiones de la bocina exponencial de Salmon.	57
Figura 4-12: Importación del modelo 3D de la bocina exponencial rectangular en el software de simulación ACTRAN VI.	58
Figura 4-13: Sensor integrado de la estación meteorológica <i>Davis Vantage VUE 6520</i>	59
Figura 4-14: Condición de superficie no reflejante asignada alrededor de la abertura de la boca, en los modelos de tres dimensiones.	60
Figura 4-15: Simulación del campo acústico al interior de las bocinas, en términos de la velocidad de partícula y en la frecuencia de 1 kHz.	62
Figura 4-16: Respuesta en frecuencia obtenida con la condición de excitación establecida en el ACTRAN VI.	63
Figura 4-17: Bocinas y soportes modelados en el software de impresión <i>Replicator G</i>	65
Figura 4-18: Configuraciones de medición de la respuesta en frecuencia, propuestas durante el desarrollo ingenieril.	66
Figura 5-1: Respuesta en frecuencia, medida y simulada, con la bocina exponencial de Salmon sin material absorbente.	69
Figura 5-2: Respuesta en frecuencia, medida y simulada, con la bocina exponencial rectangular sin material absorbente.	70
Figura 5-3: Respuesta en frecuencia, medida y simulada, con la bocina cónica sin material absorbente.	70
Figura 5-4: Simulación del campo acústico al interior de las bocinas, a través del método de los elementos finitos FEM, en términos de la velocidad de partícula v	71
Figura 5-5: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial de Salmon, con los cuatro materiales ubicados en la boca.	71
Figura 5-6: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial de Salmon, con los cuatro materiales ubicados en la garganta.	72
Figura 5-7: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial de Salmon, con los cuatro materiales ubicados en la mitad.	72

Figura 5-8: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial rectangular, con los cuatro materiales ubicados en la boca.....	73
Figura 5-9: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial rectangular, con los cuatro materiales ubicados en la garganta.....	73
Figura 5-10: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial rectangular, con los cuatro materiales ubicados en la mitad.	74
Figura 5-11: Respuesta en frecuencia de la bocina cónica, con los cuatro materiales ubicados en la boca.	74
Figura 5-12: Respuesta en frecuencia de la bocina cónica, con los cuatro materiales ubicados en la garganta.	75
Figura 5-13: Respuesta en frecuencia de la bocina cónica, con los cuatro materiales ubicados en la mitad.	75
Figura 6-1: Diagrama de cajas de las RF obtenidas con la bocina exponencial de Salmon, calculado desde 500 Hz hasta 5 kHz.	78
Figura 6-2: Coeficiente de correlación r calculado entre el coeficiente de absorción α y las variables que representan el comportamiento de la RF: la diferencia de presión sonora ΔP , la desviación estándar ΔDE , el rango ΔR y el coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$	88
Figura 6-3: Simulación del campo acústico, de las bocinas desarrolladas en la investigación, en términos de la velocidad de partícula v <i>ms</i>	101

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1:	Propiedades mecánicas de los materiales utilizados comúnmente en la impresión de las bocinas.	12
Tabla 3-1:	Matriz de recolección de datos definida en la investigación.	36
Tabla 4-1:	Configuración establecida en las mediciones con el software Room EQ Wizard. ..	42
Tabla 4-2:	Bocinas desarrolladas en la investigación.	46
Tabla 4-3:	Parámetros asignados y obtenidos de las bocinas diseñadas en la investigación.	49
Tabla 4-4:	Propiedades de la resistencia acústica de la garganta RT obtenidas en las bocinas diseñadas en la investigación.	51
Tabla 4-5:	Propiedades de los elementos finitos que conforman los dominios de los modelos, en dos y tres dimensiones, de las bocinas.	57

Introducción

La bocina es un tubo de sección creciente que consta de dos aberturas: la garganta y la boca, siendo la primera más pequeña que la segunda. Se utiliza comúnmente para acoplar la impedancia acústica de un transductor, que está junto a la garganta, con la impedancia del medio de propagación, la cual es mayor. Esto permite aumentar la eficiencia sin tener que aplicar alta potencia eléctrica a un radiador, altavoz o *driver* de compresión, los cuales se caracterizan por generar una baja potencia acústica. Este sistema surgió con la invención del fonógrafo. En ese entonces, la forma y las dimensiones de la bocina se cambiaban de forma experimental, logrando escuchar, en algunas ocasiones, mejoras en su calidad sonora. A partir de esto, se determinó una expresión de la impedancia acústica de la garganta Z_T que describe matemáticamente el desempeño de la bocina en función de la frecuencia. Esta expresión se desarrolló primero en bocinas exponenciales, y luego en cónicas. Con estos dos tipos de bocinas se evidenció un rizado en la impedancia, siendo sinónimo de un comportamiento no-lineal en la respuesta en frecuencia RF. Se ha demostrado que las dimensiones de la bocina influyen en esta fluctuación. En concreto, una relación lineal inversamente proporcional entre el perímetro de la boca y la longitud de onda de la frecuencia define la irregularidad de la impedancia Z_T . Esta irregularidad es sinónimo de una respuesta en frecuencia con fluctuaciones, que se caracteriza por su comportamiento no-lineal. Si no se cumple la relación, se producen ondas estacionarias al interior del sistema. Lo anterior resulta desfavorable para un sistema reproductor de frecuencias medias, debido a que las dimensiones resultan imprácticas y de difícil implementación. Por ende, se recurre a nuevos métodos para desarrollar bocinas de tamaños reducidos y con un comportamiento lineal.

Los materiales absorbentes son utilizados para reducir la energía sonora de señales indeseables, como el ruido, las reflexiones, entre otras. Se caracterizan por tener unos poros interconectados que disipan térmicamente la energía acústica. El coeficiente de absorción α indica la cantidad de energía que el material puede absorber, en función de la energía incidente. Hay diversos materiales que se diferencian por su fabricación y, consecuentemente, por su coeficiente α ; los utilizados comúnmente están compuestos por fibra de vidrio, lana de roca y espuma de poliuretano. En esta investigación se

evalúa el efecto de la implementación del material absorbente en bocinas cónicas y exponenciales, con el propósito de determinar si se reduce la fluctuación que genera un comportamiento no-lineal en la respuesta en frecuencia.

En este trabajo, se diseñan y construyen tres bocinas: la bocina cónica, la bocina exponencial de Salmon y la bocina exponencial rectangular. Se utilizan cuatro materiales absorbentes: las fibras de vidrio “acustifibra” y *Black Theater*, la lana de roca “acustiplaca” y la espuma de poliuretano *Lowsound*. Las respuestas en frecuencia de las bocinas, con y sin material absorbente, se caracterizan, se comparan, se relacionan con el coeficiente de absorción α y, finalmente, se evalúan para determinar el efecto de su implementación. Debido a que la irregularidad se presenta en las frecuencias f medias – altas, el rango de f a analizar se limita desde 500 Hz hasta 5 kHz. Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, puesto que pretende concluir una realidad objetiva a partir de datos numéricos que corresponden con el nivel de presión sonora de la RF.

En el documento se muestran los pasos empleados para cumplir los objetivos, abordando diversos campos de la ingeniería como: la simulación numérica y el método de elementos finitos FEM, para representar el campo acústico al interior de las bocinas; la programación, para modelar la impedancia acústica Z_T y procesar los datos; la acústica arquitectónica y el uso de los materiales absorbentes; el dibujo técnico y la impresión 3D de las bocinas; el análisis estadístico como el ACP (análisis de componentes principales) y el ANOVA (análisis de la varianza).

Finalmente, se observa que el comportamiento fluctuante de la respuesta en frecuencia varía con el material absorbente y su ubicación dentro de la bocina. En general, el comportamiento no-lineal disminuye a pesar de que el nivel de presión sonora promedio se reduce, afectando la eficiencia que genera la bocina con el acople de impedancias. Con el ANOVA, se demuestra que las respuestas en frecuencia son significativamente diferentes al implementar el material absorbente. A falta de encontrar una relación lineal entre el comportamiento de la RF y el coeficiente de absorción de los materiales absorbentes, con base en la literatura y la simulación con el FEM, se deduce que la reducción producida por los materiales depende también de otros factores como la velocidad de partícula v , la longitud de onda λ y las ondas estacionarias.

1. Capítulo I. Problema de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

La bocina es un sistema que permite acoplar la impedancia de un altavoz con la impedancia del aire (Kinsler et al., 1950). Se utiliza para aumentar la potencia acústica que produce un altavoz con poca eficiencia, sin necesidad de aplicar una cantidad excesiva de potencia eléctrica que puede ocasionar distorsión (Beranek, 1958). También, sirve para realizar control directivo de la energía sonora radiada por el transductor (Kolbrek, 2008). Físicamente, es un tubo de sección creciente que consta de dos aberturas, denominadas garganta y boca. La primera es la abertura de menor tamaño, próxima al altavoz. La segunda es la abertura de mayor tamaño, ubicada al otro extremo del sistema. El uso de la bocina se ha extendido en los sistemas de reproducción sonora, como el refuerzo sonoro o megafonía (PA, o public address system) y en los sistemas de monitoreo (Holland, 2003; Green, 1977; Eargle et al, 2004).

Un indicador del desempeño de una bocina es la respuesta en frecuencia, siendo la cantidad de nivel de presión sonora generado en la boca por cada frecuencia. Dicho indicador está relacionado con la resistencia acústica en la garganta (Beranek, 1958), pues esta expresa la cantidad de energía sonora producida por el altavoz, en la abertura mencionada (Kinsler et al., 1950). La resistencia acústica en la garganta varía dependiendo del tipo de la bocina. Habitualmente, la resistencia acústica de una bocina exponencial es mayor, en un rango de frecuencia más amplio, que una bocina cónica. Es decir, la respuesta en frecuencia de la primera bocina mencionada tiene un ancho de banda mayor respecto a la segunda bocina (Pueo & Romá, 2003).

La respuesta en frecuencia de este tipo de bocinas presenta irregularidades, es decir, variaciones en el nivel de presión sonora en función de la frecuencia que producen un comportamiento no-lineal (Holland et al., 1991). Este efecto es causado por reflexiones originadas al interior del sistema, generadas cuando la longitud de onda de la señal transmitida es más grande que el perímetro de la boca. Estas resultan ser ondas estacionarias propagadas al interior de la bocina (Kolbrek, 2008). A

su vez, las ondas reflejadas afectan el comportamiento de la resistencia acústica de la garganta respecto a la frecuencia, la cual, presenta un rizado o fluctuación. Olson (1957) determinó que el rizado en la resistencia acústica depende de las dimensiones de la boca: la fluctuación es despreciable si el diámetro de la abertura es mayor que dos veces la longitud de onda, de la frecuencia más baja a reproducir, sobre π . Esto representa un problema en bocinas que reproducen frecuencias medias; si la frecuencia más baja a reproducir es 500 Hz, el diámetro de la boca debe ser mayor a 87 centímetros (Keele, 1973). El altavoz que opera en ese rango de frecuencias comúnmente tiene un diámetro entre 10 a 12 centímetros (Pueo & Romá, 2003), por lo que el diámetro del sistema de reproducción aumentaría 8.7 veces; una bocina con este tamaño es impráctica por su difícil implementación. De lo contrario, si las dimensiones de la boca son inferiores, el rizado de la impedancia podría ser considerable, y la respuesta en frecuencia puede alcanzar variaciones perceptibles (Dinsdale, 1974). Evidentemente, un sistema con una respuesta en frecuencia de esas características no puede ser utilizado para aplicaciones de alta calidad sonora que requieren alta fidelidad (Holland et al., 1991), ya que alteraría la señal a reproducir (Green et al., 1977). De esto, surge la necesidad de emplear métodos que atenúen la energía de las ondas reflejadas con el fin de aumentar la linealidad de la respuesta en frecuencia de una bocina con tamaños reducidos.

La energía de las ondas sonoras se reduce cuando se reflejan en una superficie, produciendo absorción. La relación entre la energía absorbida y la energía incidente en una superficie se denomina coeficiente de absorción, siendo dependiente de la frecuencia y de la composición de dicha superficie (Kuttruff, 2009). Los materiales rígidos y con poca porosidad se caracterizan por absorber poca energía, es decir, sus coeficientes de absorción son bajos; como máximo, 0.1. Pero, cuando se requiere disminuir en mayor medida la energía de ondas reflejadas indeseadas, son prácticos los materiales absorbentes. Esos materiales poseen alta porosidad que disipan la energía de la onda incidente en calor (Cox & D'Antonio, 2004). Los materiales de este tipo están compuestos de lana mineral, fibra de vidrio y espuma de poliuretano (Carrión, 1998). Con un espesor de aproximadamente una pulgada, sus coeficientes de absorción en las frecuencias medias – altas son relativamente altos, siendo igual a 0.55 a partir de 500 Hz (Barron, 2001; Kinsler et al., 1950; Cox et al., 2004).

Teniendo en cuenta el efecto de los materiales absorbentes y porosos en la energía de las ondas sonoras, al implementarlos al interior de bocinas cónicas y exponenciales con irregularidades en la respuesta en frecuencia, surge el siguiente interrogante:

¿Qué efecto tiene implementar material absorbente en la respuesta en frecuencia de bocinas cónicas y exponenciales, en el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Determinar el efecto de la implementación de material absorbente en la respuesta en frecuencia de una bocina cónica y exponencial en el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar la respuesta en frecuencia de bocinas cónicas y exponenciales en el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz, con y sin material absorbente implementado.
- Determinar las diferencias de la respuesta en frecuencia entre las bocinas en estudio, con y sin material absorbente implementado en el rango de frecuencias definido.
- Determinar la relación entre la respuesta en frecuencia y el coeficiente de absorción del material absorbente implementado al interior de bocinas cónicas y exponenciales, en el rango de frecuencias establecido.
- Evaluar el efecto de la implementación de material absorbente en la respuesta en frecuencia de las bocinas en estudio, en el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz.

1.3 Justificación

La irregularidad en la respuesta en frecuencia de las bocinas con tamaños reducidos es una desventaja si este sistema se emplea sistemas de sonido para aplicaciones de alta fidelidad sonora (Holland et al., 1991), donde se requiere una RF con un comportamiento lineal. Olson (1957) demostró que la impedancia acústica de la garganta Z_T de una bocina presenta fluctuaciones siempre que la longitud de onda de la señal transmitida fuese mayor que el diámetro de la boca. Para frecuencias medias – altas, en las que se requiere aumentar la eficiencia del radiador, la relación compromete a que las bocinas tengan unas dimensiones poco prácticas y de difícil implementación. De lo contrario, el rizado de la impedancia Z_T conlleva a que la irregularidad de la respuesta en frecuencia RF sea perceptible (Dinsdale, 1974).

La evaluación del efecto en la respuesta en frecuencia de una bocina, que se realiza en esta investigación, permite determinar si los materiales absorbentes corrigen la irregularidad que impide el uso de este sistema, de dimensiones reducidas, en aplicaciones sonoras de alta fidelidad. Este trabajo contribuye información teórica para investigaciones futuras donde se pretenda utilizar materiales porosos en sistemas de sonido como: bocinas de diferentes formas, cajas acústicas, líneas de transmisión, etc. Los pasos empleados como la simulación con los métodos de elementos finitos para predecir el campo acústico y la respuesta en frecuencia, el análisis estadístico para caracterizar la RF, la impresión de las bocinas en tres dimensiones y la programación para calcular la impedancia acústica de la garganta, pueden formar parte de la metodología desarrollada en investigaciones futuras realizadas en la Universidad, que bien pueden estar relacionadas con la línea del diseño de sistemas de sonido, la acústica y la electroacústica.

2. Capítulo II. Marco de referencia

2.1 Antecedentes del problema

Las bocinas han sido parte de diversos sistemas de reproducción sonora, como lo es el fonógrafo. Antes de que surgieran teorías de su funcionamiento, se hacían cambios en su forma y dimensión de manera experimental. Debido a que la respuesta en frecuencia y la calidad tonal de los sistemas mejoraban, fue necesario hacer ciertos estudios en bocinas (Geddes, 1989).

Webster (1919) planteó una teoría con el fin de describir el comportamiento de la bocina en función de la impedancia acústica. Para eso, tuvo que deducir una ecuación que modelara la propagación de la onda sonora al interior de la bocina. Para reducir la complejidad del análisis, asumió algunas características físicas. Una las más relevantes, fue que la onda sonora no presentaba cambios en su curvatura a medida que se distanciaba del punto de radiación; dicha ecuación se expresó en una dimensión, perpendicular al frente de onda. En su teoría, se determina la impedancia de la garganta y la boca en tubos uniformes y bocinas tipo cónicas.

Con la teoría de Webster, Ballantine (1927) y Freehafer (1940) calcularon la impedancia acústica en bocinas comúnmente usadas, las cuales, eran de tipo hiperbólico y exponencial. Extendiendo dicha teoría, Salmon (1946) propuso una familia de bocinas. Para los tipos de bocina mencionados, estableció que debían tener un área transversal *axisymmetric* o circular, pues, así cumplían el planteamiento que hizo Webster respecto a la propagación sonora.

A pesar que la bocina exponencial se caracteriza por acoplar la impedancia en un amplio rango de frecuencias, y la bocina cónica ejerce un control directivo constante, se observó un comportamiento irregular, no-lineal, en la respuesta en frecuencia y en la impedancia acústica de estas. La irregularidad se produce por ondas estacionarias que se reflejan al interior de las bocinas. Olson (1957) estableció que el radio de la boca debía ser mayor a la longitud de onda a reproducir, con el

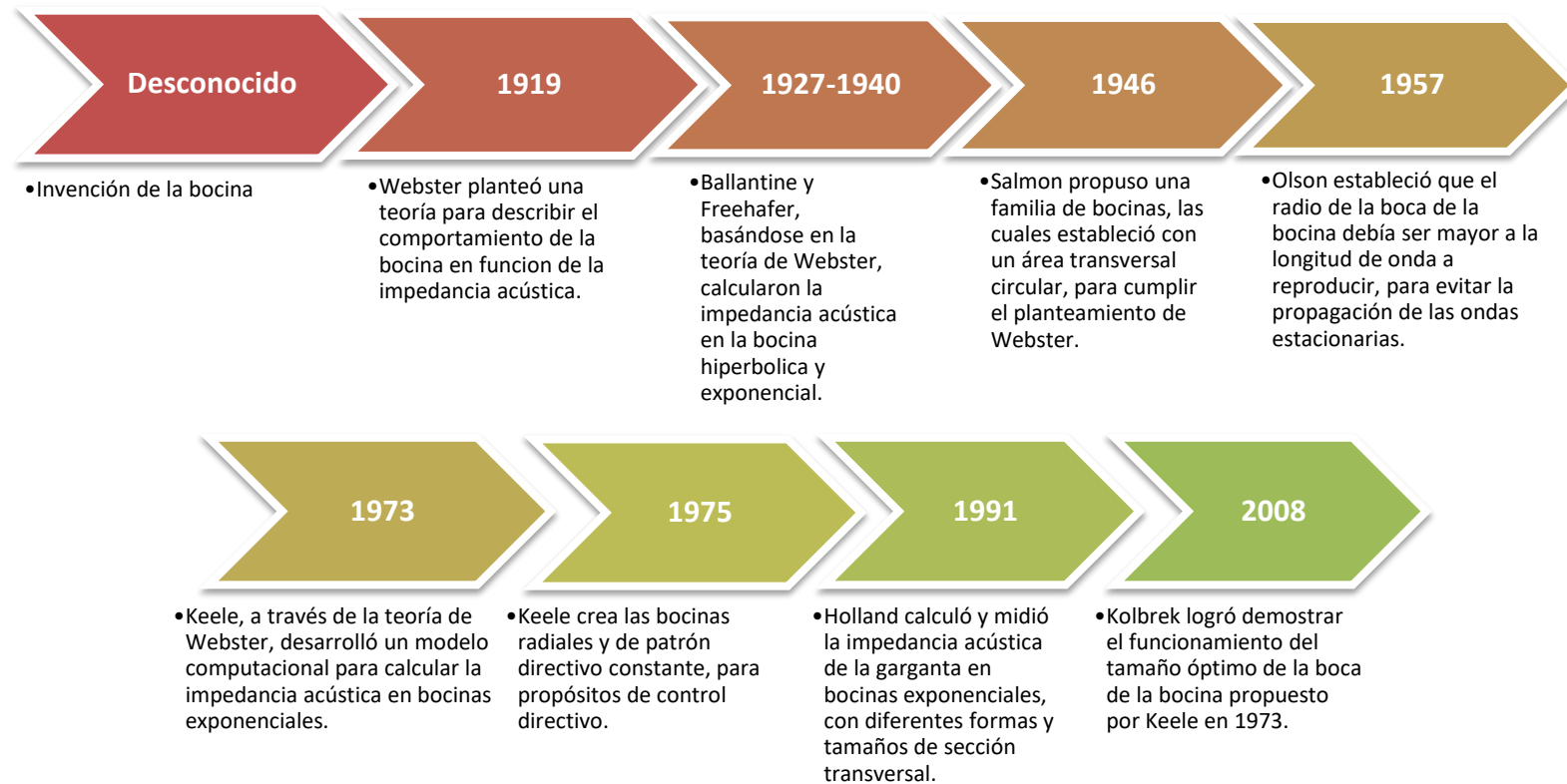
objetivo de evitar la propagación de las ondas estacionarias. Entre más grande fuese dicha abertura, la respuesta en frecuencia de la bocina sería más lineal.

Keele (1973), a través de la teoría de Webster, desarrolló un modelo computacional para calcular la impedancia acústica de la garganta en bocinas exponenciales. Con los resultados, concluyó que existe un tamaño óptimo de la boca, el cual depende del producto entre el número de onda k y el radio de dicha abertura. Entre menor o mayor sea la dimensión de la abertura, respecto al tamaño óptimo, la irregularidad en la impedancia es mayor. Posteriormente, el mismo autor (1975) creó otros tipos de bocina para propósitos de control directivo; las radiales y de patrón directivo constante, las cuales tienen formas de sección transversal rectangulares y presentan discontinuidades en el aumento del área que producen irregularidad en la impedancia acústica y en la respuesta en frecuencia.

Holland et al. (1991) calcularon y midieron la impedancia acústica de la garganta en bocinas exponenciales, con diferentes tamaños y formas de sección transversal. Con una alta correspondencia entre lo calculado y medido, afirmaron que la irregularidad de la impedancia depende de las dimensiones de la bocina. Con la investigación, encontraron que la respuesta en frecuencia tiende a ser menos lineal en bocinas con forma rectangular, siendo un inconveniente en aplicaciones de alta fidelidad sonora.

Kolbrek (2008) realizó un estudio similar. Comparó y simuló la impedancia acústica en bocinas del mismo tipo. Teniendo en cuenta las expresiones, de impedancia, obtenidas con la teoría de Webster, logró demostrar el tamaño óptimo de la boca que propuso Keele (1973).

Figura 2-1: Línea del tiempo de los antecedentes de la problemática.



Fuente: propia

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Respuesta en frecuencia

Es la relación, en amplitud y frecuencia, de una señal de salida respecto a una señal de entrada de un sistema. Es una medida que describe el comportamiento de la amplitud en función de las frecuencias que pueden pasar a través del sistema (Davis & Jones, 1989). En equipos de audio, representa el rango de frecuencias que puede capturar o reproducir un dispositivo. En el caso de un altavoz, la señal de entrada es una onda sinusoidal con una potencia eléctrica de referencia, que comúnmente es 1 Watts, y la señal de salida es el nivel de presión sonora generado a cierta distancia, soliendo ser 1 metro (Pueo & Romá, 2003). Las diferencias de la amplitud entre la señal de salida y de entrada constante permiten determinar la fidelidad del sistema (Davis & Jones, 1989). La relación de las amplitudes se denomina magnitud y se expresa en decibelios. El rango de frecuencias, en el que la variación de la amplitud es de $\pm 3 \text{ dB}$, resulta ser el ancho de banda del sistema (Ballou, 2008). El término comúnmente hace referencia a dispositivos de procesamiento de señal, como los amplificadores eléctricos, y transductores electroacústicos, como el altavoz de radiación directa, el micrófono y altavoces con bocinas (Davis & Jones, 1989). Algunos de los sistemas mencionados se caracterizan porque sus respuestas en frecuencia son no-lineales.

2.2.2 Sistema no-lineal

Es un sistema que no presenta proporción entre los cambios de su salida respecto a los cambios de su entrada (Rugh, 1981). En transductores electromecánicos y electroacústicos, como lo es el altavoz, el comportamiento no-lineal, siendo una característica inherente, se presenta cuando estos sistemas operan con altas amplitudes, ya sea de potencia, voltaje, etc., produciendo en su salida una señal distorsionada que no es generada en el dominio de pequeña señal, es decir, con bajas amplitudes (Klippel, 2003). Este comportamiento se presenta en pequeños transductores y en los *drivers* de compresión, los cuales son los sistemas comúnmente acoplados con las bocinas, que a pesar de la linealidad de su suspensión del diafragma y del montaje magnético, la señal sonora reproducida se distorsiona, especialmente en frecuencias cercanas a la de resonancia. El comportamiento no-lineal de un transductor electroacústico es causada por mecanismos inevitables, como la variación de la masa del aire y el cambio de la capacitancia (Backman, 1998).

2.2.3 Bocina

Es un tubo de sección creciente acoplado a un altavoz. Sirve para acoplar la impedancia del transductor electroacústico con la impedancia del medio, como el aire. Actúa como transformador acústico, de manera que el pequeño diafragma de la unidad motora transfiera energía a un diafragma aparente de mayor área. Como se puede observar en la Figura 2-2, el sistema consta de dos aberturas: el extremo más ancho se denomina “boca” (*mouth*, en inglés), mientras que el extremo angosto es llamado “garganta” (*throat*, en inglés), el cual tiene un área elegida considerando la adaptación a la impedancia acústica del elemento radiador.

Por su efecto de transformación, la bocina se caracteriza por aumentar la eficiencia, entre el 10% al 50%, de un transductor que por lo general está en el margen del 1% al 5% (Holland et al., 1991). Otro aspecto de la bocina es el control directivo que ejerce sobre la energía sonora radiada por un transductor electroacústico; las paredes del tubo restringen la divergencia de las ondas acústicas (Kolbrek, 2008). Comúnmente, el dispositivo acoplado a la bocina suele ser un *driver* o núcleo de compresión, el cual, se caracteriza por tener una unidad motora, encargada de la transducción electroacústica, un corrector de fase, para generar un frente de onda isofásico, y una cámara de compresión. La razón por la cual se usa el *driver* de compresión, frente a un altavoz convencional, es porque la velocidad de su diafragma no depende de la frecuencia, logrando producir una impedancia acústica resistiva sobre la garganta, en un amplio rango de f (Pueo & Romá, 2003).

La bocina es utilizada en múltiples aplicaciones, como el refuerzo sonoro y la megafonía, donde se requieren sistemas de reproducción con un patrón directivo constante con la frecuencia. También es utilizada en sistemas de monitoreo, en especial, cuando se necesita aumentar el nivel de potencia de un altavoz en la banda de frecuencias medias – altas, conservando su alta fidelidad (Beranek, 1954).

Las paredes de la bocina se caracterizan por ser lisas y por su alta rigidez. El material empleado para su construcción suele ser la madera, el policarbonato, el aluminio, la fibra de vidrio, entre otros (Holland, 2003). Igualmente, es posible imprimir las bocinas en 3D, utilizando los dos plásticos convencionales: PLA (Poliácido láctico) y ABS (Acrilonitrilo Budenio Estireno). Estos materiales se caracterizan por tener las siguientes propiedades mecánicas:

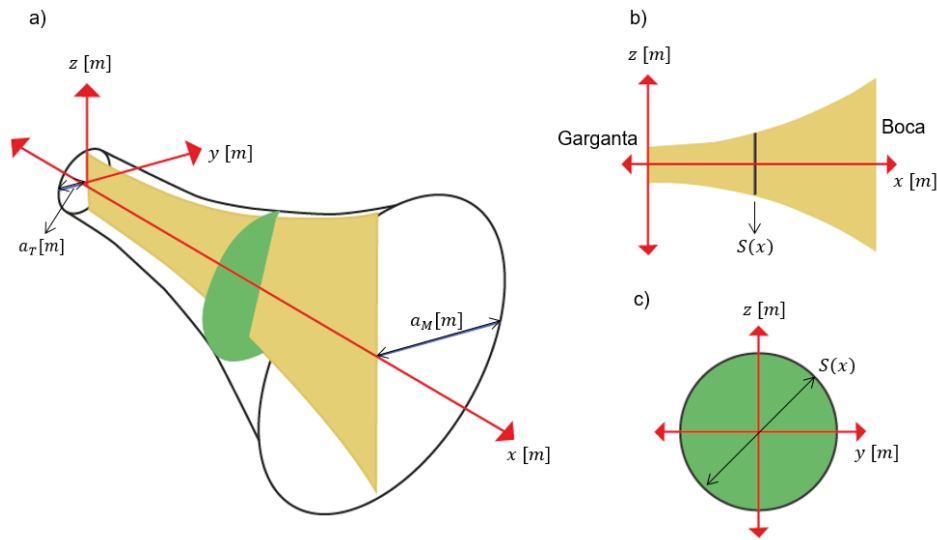
Tabla 2-1: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados comúnmente en la impresión de las bocinas.

Material	E [GPa]
ABS	1,7-2,8
PLA	3,5

Fuente: (Brydson, 1999)

Debido a que el módulo de *Young* E del PLA es mayor que el del ABS, el primer material mencionado posee una mayor rigidez, es decir, tiene más capacidad de resistir una fuerza sin deformarse. A partir de esto, se logran imprimir piezas más lisas y rígidas, reduciendo la posibilidad de que la bocina imprimida resuene mecánicamente.

Figura 2-2: Ilustración de una bocina exponencial de Salmon¹.



Fuente: propia

¹ Figura a: vista isométrica de la bocina exponencial, con indicaciones del radio de la garganta a_T y de la boca a_M . Figura b: perfil del área de la bocina, definida por $S(x)$. Figura c: forma del área transversal $S(x)$, que por ser una bocina de Salmon, es *axisymmetric* o, en otras palabras, tiene una correspondencia de posición, forma y tamaño sobre un eje.

Un indicador del comportamiento de la reproducción sonora de una bocina es la respuesta en frecuencia. Por otro lado, existen diferentes tipos de bocinas que difieren en el aumento de la eficiencia y el control directivo.

Respuesta en frecuencia de bocinas

En términos de amplitud, la respuesta en frecuencia es el nivel de presión sonora $SPL [dB]$ producido al aplicar una señal eléctrica de referencia a un transductor electroacústico, en un rango de frecuencias. El nivel de presión sonora es medido a cierta distancia del transductor que, por lo general, suele ser a 1 metro; en casos de un sistema de reproducción con bocinas, la distancia se toma desde la garganta de la bocina. Para obtener una respuesta en frecuencia, real y precisa del sistema, el lugar de la medición debe estar libre de reflexiones, prefiriendo ser una cámara anecoica. La señal eléctrica, con forma de onda sinusoidal, se caracteriza por su voltaje y potencia constante (Beranek, 1954).

La respuesta en frecuencia de las bocinas está relacionada con la impedancia acústica de la garganta Z_T . Dicha impedancia es el valor que cuantifica la reacción del medio cuando un transductor electroacústico, que está acoplado en la garganta de la bocina, radia energía. La impedancia Z_T es un término complejo compuesto por una parte real, que es la resistencia acústica R_T , y una parte imaginaria, que es la reactancia acústica de la garganta X_T :

$$Z_T = R_T + jX_T \left[N * s / m^5 \right]; R_T \left[N * s / m^5 \right]; X_T \left[N * s / m^5 \right] \quad (2.1)$$

Cierta cantidad de energía es disipada en el medio, es decir, es convertida en sonido, representando la presión sonora. La energía restante es almacenada en el medio ya que produce un movimiento de aire sin compresión apreciable. La resistencia acústica de la garganta está asociada con la energía útil o real, mientras que la reactancia acústica representa la energía almacenada (Pueo & Romá, 2003). La respuesta en frecuencia de una bocina se determina en el rango en que la impedancia acústica Z_T esté parcialmente definida por su resistencia acústica R_T (Beranek, 1954). Es común encontrar en la literatura el comportamiento de la reproducción sonora de los altavoces de bocina en términos de la impedancia acústica de la garganta Z_T , mientras que los fabricantes usan la respuesta en frecuencia en las hojas de datos de los sistemas. Para los autores fue fundamental hacer una revisión de literatura sobre la teoría de las bocinas con el fin de realizar una mejor comprensión de los métodos ingenieriles aplicados con dichos sistemas en investigaciones pasadas.

Teoría de bocinas

Desde su creación y hasta la actualidad, el propósito principal de las bocinas, en los dispositivos de reproducción sonora, ha sido acoplar la impedancia acústica del transductor con la del medio de propagación. Eso es evidente con el fonógrafo, utilizado para brindar la ganancia suficiente que permita emitir niveles de presión sonora de las señales producidas por dicho sistema mecánico, sin la necesidad de usar amplificación eléctrica que no estaba disponible en la época de su creación. Con los cambios hechos en la formas de las bocinas del fonógrafo se detectaron mejoras en la respuesta en frecuencia del sistema. Por tal razón, surgieron investigaciones para comprender a profundidad el funcionamiento de las bocinas (Geddes, 1989).

A raíz de la importancia de la impedancia acústica, considerada como un término complejo capaz de describir la reacción total de un sistema oscilante, Webster (1919) realizó un estudio para determinar el comportamiento de la impedancia en una bocina. Primero, realizó el análisis de una cámara con un pistón vibrante en un extremo, mientras que en el otro, estaba compuesta por una abertura que permitía el flujo de volumen de aire hacia el exterior. Tuvo en cuenta tres impedancias en la cámara; la primera, que resulta ser mecánica, está relacionada con el movimiento de la superficie en vibración; la segunda y tercera, siendo acústicas, son las producidas al interior de la cámara y en la abertura, respectivamente. Luego, por estar paralelas, estableció que la impedancia acústica, al interior y en el orificio, eran reciprocas. Dicho criterio fue adaptado al análisis de las bocinas. Sin embargo, para reducir complejidad al estudio, el autor asumió que el área transversal $S(x)$ de la bocina era lo suficientemente pequeño, o infinitesimal, para considerar que la onda propagada al interior y sobre el eje del dispositivo fuese plana. Así, Webster dedujo la ecuación de onda de bocinas.

$$\frac{1}{S(x)} \frac{d}{dx} \left(S(x) \frac{dp}{dx} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 p}{dt^2} = 0 \quad (2.2)$$

Siendo p la presión sonora y c la velocidad del sonido. Considerando un movimiento periódico simple asociado con la presión $p = Ae^{j\omega t}$, $\frac{d^2 p}{dt^2} = -\omega^2 p$, siendo ω la frecuencia angular, se obtiene la expresión (2.3), donde el número de onda $k = \omega/c$.

$$\frac{d^2 p}{dx^2} + \frac{d \ln S(x)}{dx} \frac{dp}{dx} + k^2 p = 0 \quad (2.3)$$

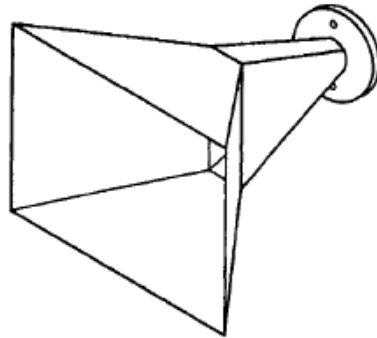
Obteniendo las soluciones de la ecuación diferencial y teniendo en cuenta la reciprocidad de las impedancias, el autor determinó la impedancia acústica de las dos aberturas Z_T y Z_M , en diferentes tipos de bocinas que son definidas por el aumento específico del área transversal $S(x)$, desde la garganta hasta la boca. En dicho artículo, la teoría se aplica en tubos y bocinas con ensanchamiento cónico, la cual, se detalla con profundidad en la sección **Tipos de bocina**. Después de la publicación de Webster, autores como Ballantine (1927) y Freehafer (1940) solucionan la ecuación (2.3) para obtener la impedancia en bocinas de tipo exponencial e hiperbólico. Salmon (1946) propuso que las bocinas mencionadas con antelación tuviesen formas circulares en su sección transversal para cumplir la teoría unidimensional de Webster. Geddes (1989) menciona que la teoría de Webster es errónea, ya que hizo suposiciones físicamente imposibles. En especial, criticó la idea de la propagación de la onda plana, pues argumenta que el centro de curvatura cambia por la divergencia. Esto solo puede ser aplicado en tubos, bocinas cónicas, hiperbólicas y bocinas con radios menores a la longitud de onda a transmitir (Putland, 1993). Además, Geddes propone que dicha teoría está incompleta, debido a que no permite predecir el patrón directivo, siendo un propósito fundamental en sistemas de reproducción sonora. Como solución, plantea una teoría para predecir el patrón directivo y la impedancia en bocinas con perfiles de área diferentes a las descritas anteriormente.

A pesar de las críticas, se ha demostrado que es posible realizar diseños óptimos de bocinas en función de la impedancia acústica que surge de la teoría de Webster. Por medio de recursos computacionales, Keele (1973) logró definir el tamaño adecuado de la boca según la impedancia acústica de la garganta. Por otro lado, Holland et al. (1991) y Kolbrek (2008) lograron simular, predecir y comparar, con mediciones experimentales, el comportamiento de la impedancia acústica en bocinas exponenciales. Estas investigaciones demuestran que la respuesta en frecuencia de las bocinas se caracteriza por tener variaciones, siendo considerables dependiendo de su tamaño y su perfil de área.

Irregularidades o fluctuaciones en la respuesta en frecuencia de una bocina.

La respuesta en frecuencia de las bocinas presenta irregularidades, es decir, variaciones en el nivel de presión sonora, en función de la frecuencia, con un comportamiento no-lineal (Holland et al., 1991). Este efecto es causado por reflexiones que producen ondas estacionarias al interior del sistema. Las reflexiones se producen cuando; la longitud de onda de la señal transmitida es más grande que el diámetro de la boca; el aumento del área de la bocina, en función de la distancia $S(x)$, presenta discontinuidades, como se ilustra en la Figura 2-3 (Geddes, 1989).

Figura 2-3: Bocina de patrón directivo constante².



Fuente: (Holland et al., 1991)

Con el aumento de la frecuencia, la irregularidad de la respuesta en frecuencia disminuye. Una bocina, con dimensiones pequeñas para frecuencias con longitudes de onda superiores a las de la boca, resulta actuando como un tubo de resonancia (Keele, 1973). A su vez, las ondas reflejadas afectan el comportamiento de la resistencia acústica de la garganta R_T respecto a la frecuencia, la cual, se ve alterada por un rizado o fluctuación.

Se han desarrollado diversos métodos para disminuir la fluctuación en la R_T en bocinas que surgieron de la teoría de Webster: Olson (1957) determinó que el rizado en la resistencia acústica depende de las dimensiones de la boca en las bocinas exponenciales pertenecientes a la familia de Salmon (1946); la fluctuación es despreciable si el diámetro de la abertura es mayor que cuatro veces la longitud de onda, de la frecuencia más baja a reproducir, sobre π . En general y para cualquier tipo de bocina, a medida que aumenta el radio de la boca, la variación de la resistencia R_T es menor, siendo ideal una bocina con dimensiones infinitas. Keele (1973) demostró que existe un tamaño óptimo de la boca para una frecuencia determinada en las bocinas exponenciales. En concreto, el producto entre el número de onda k , dependiente de la frecuencia, y del radio de la boca a_m debe ser igual o cercano a 1 (ver Ecuación (2.4)). En cambio, si dicho producto es mucho menor o mucho

² Bocina, diseñada por Keele (1975), que brinda un ángulo de cobertura constante en un amplio rango de frecuencia, disminuyendo la linealidad de la respuesta en frecuencia por el aumento discontinuo del área transversal $S(x)$, desde la abertura de la garganta hasta la boca.

mayor a uno, tal como lo muestra la relación matemática (2.5), el rizado de la R_T es significativo y, por ende, la irregularidad en la respuesta en frecuencia también lo es.

$$k * a \approx 1 \quad (2.4)$$

$$k * a \ll 1 \vee k * a \gg 1 \quad (2.5)$$

Con el hallazgo de Keele, se descartan las dimensiones infinitas que se consideraron ideales para el control de la fluctuación. Sin embargo, el tamaño óptimo de la boca resulta ser impráctico para obtener una respuesta en frecuencia lineal en el rango medio.

Tipos de bocina.

Las bocinas difieren, tanto en el aumento de la eficiencia que pueden realizar, como en el control directivo y en la respuesta en frecuencia que producen. El diseño, de las bocinas que surgieron a partir de la teoría de Webster, como lo son la cónica y exponencial, depende de la expresión matemática unidimensional que define el aumento del área transversal $S(x)$, desde la garganta hasta la boca, es decir, el perfil del área. Debido a que es necesario cumplir únicamente con la ecuación que define el perfil del área en el diseño, la forma del área transversal de la bocina puede ser elegida a criterio del diseñador (Holland et al., 1991), que puede ser considerada según el control directivo y el ángulo de cobertura deseado. A continuación, se detallarán algunos tipos de bocinas, con relación a su perfil del área y su forma de sección transversal.

Perfil de área

- **Bocina Exponencial.**

Consiste en un tubo, el cual, su área transversal aumenta de forma exponencial desde la abertura de la garganta S_T hasta la boca. La expresión matemática que define el aumento del área, a lo largo de la distancia x , es:

$$S(x) = S_T e^{mx} [m^2], \text{ para } 0 \leq x \leq l \quad (2.6)$$

Siendo $S(x)$ el área de la bocina, en la distancia x , S_T el área de la garganta y l la longitud de la bocina. Por lo general, el área del driver de compresión es igual a S_T . El factor de ensanchamiento m , indica la razón de cambio del área respecto a la distancia. Este tipo de bocinas se caracteriza porque su resistencia acústica de la garganta R_T tiene una frecuencia de corte f_c , siendo equivalente a:

$$f_c = \frac{mc}{4\pi} [Hz] \quad (2.7)$$

Donde c es la velocidad del sonido (Pueo & Romá, 2003). Las ecuaciones anteriores son utilizadas para diseñar este tipo de bocinas (Beranek, 1954; Kolbrek, 2008). La impedancia acústica de la garganta Z_T , obtenida en la teoría de Webster, y siendo recíproca a la impedancia acústica de la boca Z_M , es la siguiente:

$$Z_T = \frac{\rho_0 c}{S_T} \left[\frac{S_M Z_M [\cos(bl + \theta)] + j \rho_0 c [\sin(bl)]}{j S_M Z_M [\sin(bl)] + \rho_0 c [\cos(bl - \theta)]} \right] [Ohm \text{ acústico}] \quad (2.8)$$

Siendo ρ_0 la densidad del aire, l la longitud de la bocina, S_M el área transversal de la boca. Las variables θ y b surgen de la solución de la ecuación diferencial lineal de bocinas (2.3), que son igual a (Olson, 1957):

$$\theta = \tan^{-1}(a/b) \quad (2.9)$$

$$a = m/2 \quad (2.10)$$

$$b = \frac{1}{2} \sqrt{4k^2 - m^2} \quad (2.11)$$

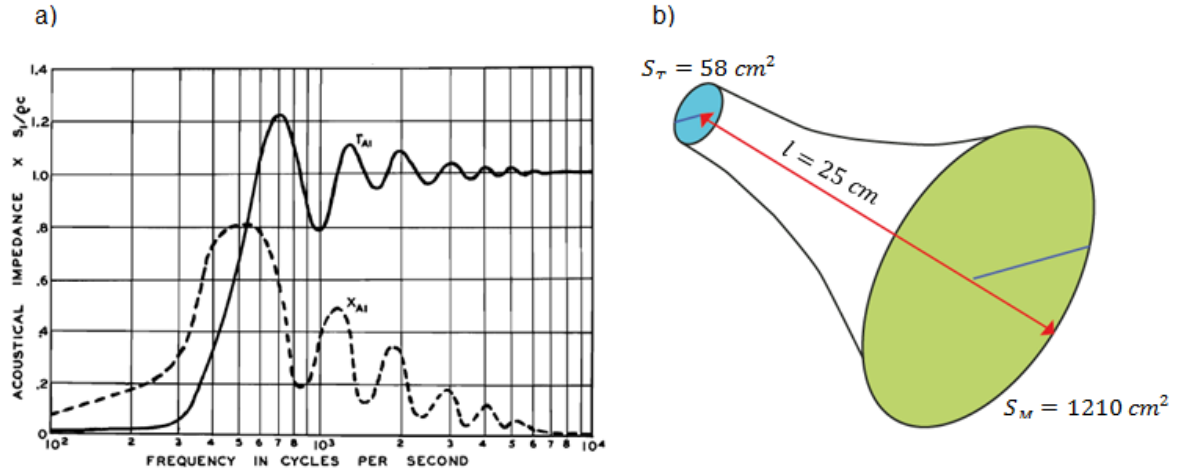
Investigadores como Keele (1973), Holland et al. (1991) y Kolbrek (2008) utilizaron las ecuaciones descritas con antelación para predecir la impedancia acústica de la garganta.

- Bocina Cónica.

Es un tubo de sección creciente que tiene un perfil del área con forma de cono. El área transversal $S(x)$ con relación a la distancia, está definido mediante la siguiente expresión matemática:

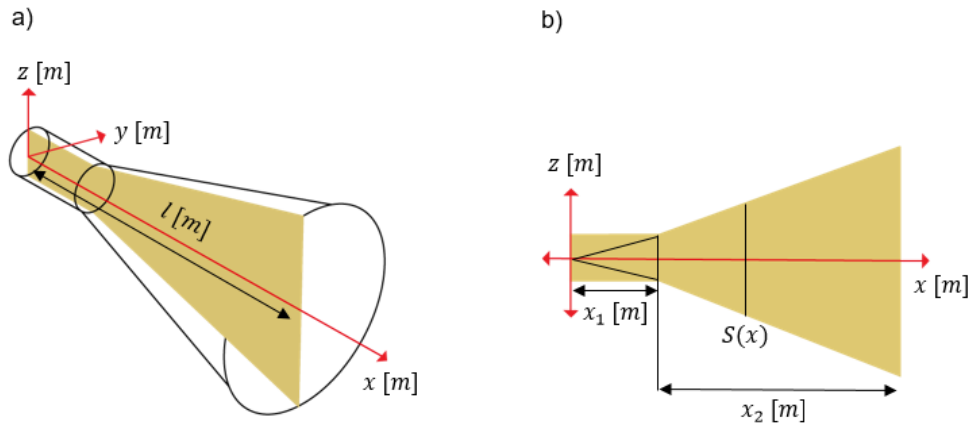
$$S(x) = S_T \left(\frac{x}{x_1} \right)^2 [m^2] \quad (2.12)$$

Siendo $S(x)$ el área de la bocina, en la distancia x , S_T el área de la garganta y x_1 la distancia desde la garganta hasta el vértice, el cual, es el punto donde la bocina comienza a tomar forma de cono. Por lo general, el área del diafragma del transductor electroacústico es igual a S_T (Pueo & Romá, 2003). Con la ecuación (2.12) se logra hacer el respectivo diseño, obteniendo una bocina con la forma ilustrada en la Figura 2-5.

Figura 2-4: Impedancia acústica teórica de una bocina exponencial³.

Fuente a: (Olson, 1957)

Fuente b: propia.

Figura 2-5: Ilustración de una bocina cónica⁴.

Fuente: propia.

³ Figura a: resistencia y reactancia acústica de la garganta, calculada según la teoría de Webster. Figura b: vista isométrica de la bocina exponencial, indicando la medida de la longitud l , el área de la garganta S_T y de la boca S_M en centímetros.

⁴ Figura a: vista isométrica de la bocina cónica, siendo l el largo total. Figura b: perfil del área de la bocina; x_2 es la distancia desde el vértice hasta la boca.

La impedancia acústica de la garganta Z_T de una bocina cónica, con base en la teoría de Webster y la ecuación diferencial de bocinas, y siendo recíproca a la impedancia acústica de la boca Z_M , es definida como la ecuación (2.13):

$$Z_T = \frac{\rho_0 c}{S_T} \left[\frac{jZ_M \frac{\sin(k[l-\theta_2])}{\sin(k\theta_2)} + \frac{\rho_0 c}{S_M} \sin(kl)}{Z_M \frac{\sin(k[l+\theta_1-\theta_2])}{\sin(k\theta_1)\sin(k\theta_2)} - \frac{j\rho_0 c \sin(k[l+\theta_1])}{S_M \sin(k\theta_1)}} \right] \quad (2.13)$$

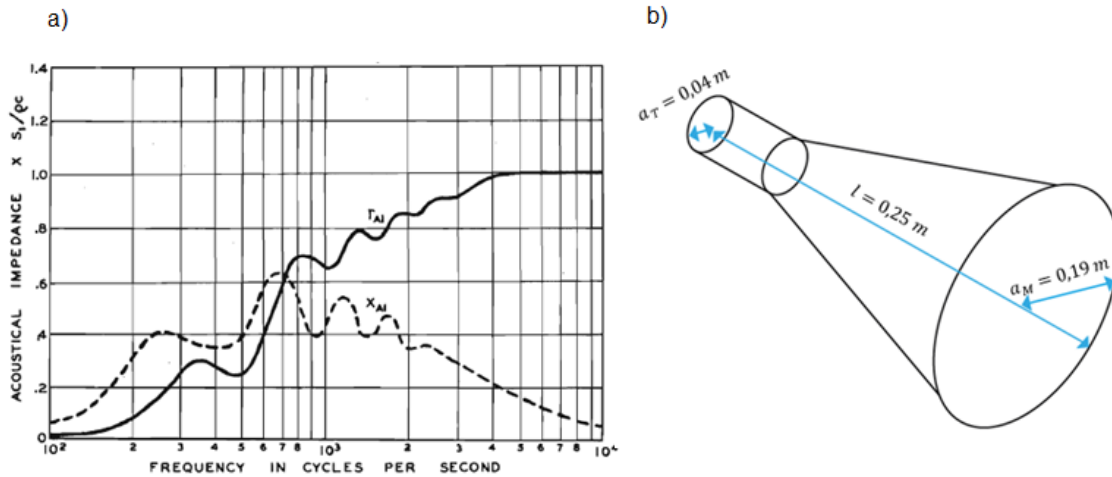
Donde k es el número de onda. Las variables $k\theta_1$ y $k\theta_2$ se obtienen por medio de la solución de la ecuación diferencial lineal de Webster (2.3), siendo:

$$k\theta_1 = \tan^{-1}(kx_1) \quad (2.14)$$

$$k\theta_2 = \tan^{-1}(kx_2) \quad (2.15)$$

Siendo x_2 la distancia desde el vértice hasta la abertura de la boca (Olson, 1957).

Figura 2-6: Impedancia acústica teórica de una bocina cónica⁵.



Fuente a: (Olson, 1957)

Fuente b: propia.

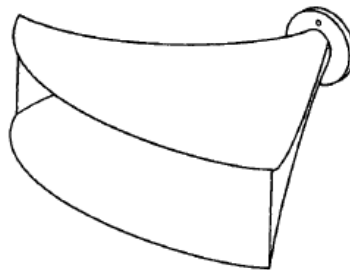
⁵ Figura a: resistencia y reactancia acústica de la garganta, de la bocina cónica mostrada y acotada en la Figura b.

Como se puede ver en la Figura 2-4 y la Figura 2-6, las bocinas cónicas, en comparación con las exponenciales, tienen un rango de frecuencias más limitado en los que la impedancia acústica de la garganta es equivalente a su resistencia R_T . A su vez, la reactancia X_T de la bocina cónica, que disminuye al aumentar la frecuencia, se produce en un mayor rango de frecuencias respecto a la bocina exponencial. Debido a que la resistencia R_T es la cantidad de energía convertida en sonido, y la reactancia X_T es la energía almacenada en el medio, se afirma que las bocinas cónicas reproducen un ancho de banda de respuesta en frecuencia más reducido que las exponenciales. No obstante, es utilizado en aplicaciones donde se requiere un patrón directivo constante (Kolbrek, 2008).

Formas del área transversal.

Como se mencionó anteriormente, el diseño de las bocinas, que surgieron de la teoría de Webster, depende de la expresión matemática unidimensional que determina su perfil de área. Esto permite que cada diseñador defina la forma de la sección transversal a su criterio, siempre que cumpla la ecuación respectiva. El cambio de las formas transversales de una bocina, con perfiles de área y tamaños equivalentes, puede comprometer cambios significativos en la eficiencia, la respuesta en frecuencia y el control directivo. Por esta razón, han surgido bocinas con múltiples apariencias para propósitos específicos (Holland et al., 1991). Una de las formas más comunes son las *axisymmetrics*, conformadas por la familia de Salmon, las cuales tienen secciones transversales circulares, como se ilustra en la Figura 2-2 (Salmon, 1946). Por otro lado, las bocinas radiales, como la mostrada en la Figura 2-7, se caracterizan por tener los lados laterales rectos, que son ajustados a un ángulo directivo deseado, los cuales forman una bocina cónica. Sus lados restantes, siendo el superior y el inferior, tienen cierta curvatura, formando una bocina exponencial. Esta forma de bocina, en comparación de la *axisymmetric*, aumenta el ángulo de cobertura horizontal aunque limita el ángulo de cobertura del eje vertical (Pueo & Romá, 2003).

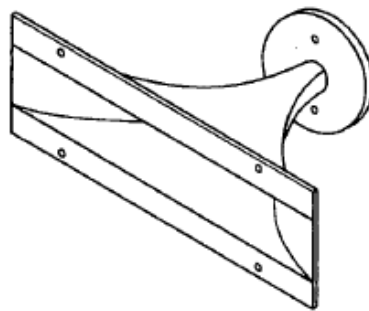
Figura 2-7: Ilustración de una bocina radial.



Fuente: (Holland et al., 1991)

Además, se han desarrollado bocinas con secciones transversales rectangulares; estas pueden combinar dos lados rectos y dos lados con curvatura, similares a las bocinas con forma radial, o sus cuatro lados con un ensanchamiento de forma exponencial. En este caso, la terminación de la boca es recta, a diferencia de las mencionadas con antelación. Al igual que la bocina de patrón directivo constante, ilustrada en la Figura 2-3, esta bocina presenta irregularidades considerables en su respuesta en frecuencia ya que la propagación del frente de onda, entre la terminación recta y el medio, presenta discontinuidad. Esta forma de bocinas optimiza la directividad, en comparación con las *axisymmetrics*, aunque reduce, en pocas cantidades, la eficiencia en frecuencias bajas. (Holland et al., 1991).

Figura 2-8: Ilustración de una bocina rectangular exponencial.



Fuente: (Holland et al., 1991)

Las ondas estacionarias, como en esta y otras aplicaciones de alta fidelidad, pueden resultar indeseables debido a que representan resonancias o variaciones de los niveles de la presión sonora. Una alternativa para controlar dichas ondas se efectúa a través de la absorción acústica.

2.2.4 Absorción del sonido

Es la reducción de la energía de las ondas sonoras. La reducción se produce cuando se reflejan sobre una superficie, o cuando se propagan libremente por el aire, siendo considerable en casos en que se efectúe en recintos relativamente grandes y en frecuencias altas. La absorción del sonido se puede ejercer por diversos mecanismos y en diferentes magnitudes, como sucede con los materiales porosos por medio de la disipación de la energía sonora a térmica. Los mecanismos de absorción se emplean con fines particulares, como en la eliminación de reflexiones sonoras indeseables y la reducción de la energía acústica en recintos con altos niveles de ruido (Kuttruff, 2009).

La magnitud de absorción varía con la superficie, sus propiedades físicas y detalles constructivos. Si se desea realizar un diseño acústico, con materiales que generen una absorción deseada, resulta indispensable tener indicador que mida dicha magnitud, como lo es el coeficiente de absorción (Carrión, 1998).

Coeficiente de absorción α .

Es la relación entre la energía sonora absorbida E_{abs} y la energía incidente E_{inc} en una superficie.

$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E_{inc}} \quad (2.16)$$

La energía absorbida E_{abs} es disipada por la superficie del material, o transmitida a través de este. Esta relación depende de la frecuencia de la onda sonora incidente, por ende, se suele medir en bandas de octava o tercio de octava (Barron, 2001). En ocasiones, se usa el coeficiente de reducción acústica NRC como una expresión más general para indicar el grado de absorción de una superficie; es la media aritmética entre el coeficiente de absorción de las bandas de octava entre 250Hz y 1kHz (Carrión, 1998).

Existen factores intrínsecos del material que influyen en la cantidad del coeficiente de absorción, los cuales dependen medio de propagación. La absorción de las ondas sonoras está asociada por la viscosidad y la conducción térmica, las cuales varían dependiendo del grosor de la lámina (Kinsler et al., 1950).

Se han desarrollado métodos para medir el coeficiente de absorción de una superficie, por ejemplo; la medición a través del tubo de impedancia bajo la norma ISO 10534-2; la medición en una cámara reverberante, bajo la norma ISO 354; la medición *in situ* del material absorbente (Mommertz, 1996; Cox & D'Antonio, 2004). En la mayoría de los casos, la medición del coeficiente de absorción es realizada por el fabricante, y sus resultados son entregados al cliente. Uno de los mecanismos empleados frecuentemente en la reducción de la energía sonora, es el material absorbente.

Material absorbente.

Son materiales compuestos por una cantidad de canales o poros interconectados, en los cuales, una onda sonora incide y se transmite (Carrión, 1998). El material absorbente se caracteriza por la porosidad y el flujo de resistencia. La porosidad es la fracción de volumen que no es ocupada por la

estructura del material (Kuttruff, 2009). El flujo de la resistencia, que tiene una relación dependiente con la densidad, expresa la cantidad de energía perdida por los efectos en la frontera del material. Por efectos térmicos y de viscosidad, la onda acústica se ve alterada por una pérdida de energía. En el primer caso, se genera una transferencia de calor entre el aire y el material. En el segundo caso, la energía de la onda sonora se reduce por la fricción en las paredes de los poros. Si el material tiene más porosidad, la energía absorbida es mayor (Cox & D'Antonio, 2004). Los sistemas de los poros pueden estar abiertos o cerrados. Lo ideal, es que los poros estén abiertos ya que deben ser accesibles, desde el exterior, para que la onda pueda penetrar sobre estos (Kuttruff, 2009).

Para producir una cantidad significativa de absorción, los materiales absorbentes deben ubicarse en los puntos donde la velocidad de partícula de la onda sea mayor. Esto se logra siempre que el espesor sea un décimo o, en el caso más ideal, un cuarto de longitud de onda. Por ende, entre más grueso sea el material, la absorción en bajas frecuencias incrementa. En casos de pretender aumentar la absorción con materiales delgados, basta con ubicarlo a una distancia óptima, según la velocidad de partícula, respecto a la superficie reflejante. Otro aspecto, a tener en cuenta, es la densidad del material. El desacople de impedancia entre el aire y el material, por su alto flujo de resistividad, reducen su coeficiente de absorción. Además, la absorción depende del ángulo de incidencia de la onda sonora; tiende a aumentar a medida que el ángulo tenga mayor diferencia respecto a la incidencia normal en la superficie (Cox & D'Antonio, 2004, pp. 159).

Hay diversos tipos de materiales absorbentes porosos, fabricados con sustancias granulares o fibrosas. Por ejemplo, la lana mineral, compuesta por roca basáltica, arena y vidrio reciclado. Por otro lado, la espuma de poliuretano, con estructuras de porosidad abiertas o cerradas. Existen ciertas diferencias en la absorción de los materiales granulares y fibrosos; los granulares tienden a tener menor magnitud de absorción, por su menor interconexión de canales, respecto a los fibrosos. En general, el coeficiente de absorción varía más con la frecuencia en los materiales granulares que en los fibrosos; entre más espesor tenga el material, menor variación presentará su absorción. Generalmente, los materiales granulares alcanzan coeficientes α de 0.8, mientras que en los fibrosos dicho valor alcanza a ser 1 (Cox & D'Antonio, 2004).

2.2.5 Métodos numéricos

Son procedimientos utilizados para resolver soluciones de problemas complejos, a través de cálculos aritméticos simples (Osorio, 2007). Cada procedimiento detalla una cantidad finita de instrucciones que expresan una serie de operaciones algebraicas y lógicas, produciendo una aproximación a la solución del problema. Por lo general, los procedimientos son traducidos a algoritmos iterativos que requieren ciertos recursos computacionales, los cuales, determinan la eficiencia y el error de aproximación (Asmar, 1999). Los métodos se emplean para resolver problemas de fenómenos físicos, descritos por modelos matemáticos, o de un sistema de los que no se puede obtener una solución directa mediante el método analítico de su ecuación diferencial. Con los métodos numéricos es posible; realizar la modelación o construcción de un modelo matemático que reproduzca el comportamiento observado del sistema; desarrollar la simulación o asociar un modelo matemático conocido a una situación diferente (González & Weston, 2014).

En la acústica, los métodos numéricos han permitido modelar y simular el campo acústico al interior de cavidades, abiertas y cerradas, así como la radiación sonora de una fuente, la interacción entre una superficie vibrante y el medio de propagación, entre otros (Kirkup, 2007). Estos casos, por lo general, deben ser modelados con geometrías complejas y ciertas condiciones de frontera, los cuales, no pueden ser resueltos por métodos analíticos. Además, el modelo matemático que describe el comportamiento de los sistemas mencionados es la ecuación de onda. Por lo cual, resulta complejo modelar o simular dichos sistemas ya que son continuos, es decir, sus variaciones tienen dependencia en el tiempo y el espacio (González & Weston, 2014). Alternativamente, se usan métodos que representen dichos comportamientos de forma discreta, y después, se solucionan ecuaciones diferenciales parciales obtenidas durante el proceso (Geaves & Heenwood, 1996). Los métodos numéricos más utilizados, en el campo de la acústica, son el método de elementos de frontera BEM, el método de diferencias finitas FDA, y el método de los elementos finitos.

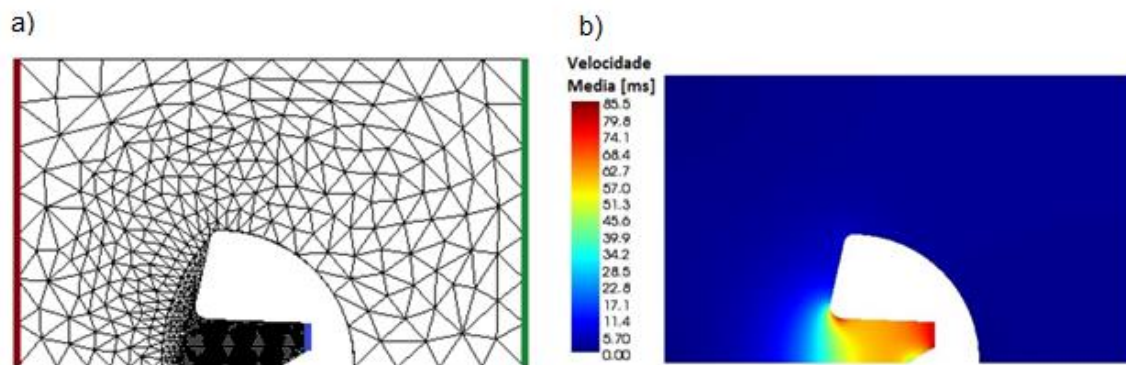
Método de los elementos finitos FEM

Es un método que reemplaza el dominio un sistema continuo en uno discreto. Resulta útil para la simulación acústica, ya que la solución de la ecuación diferencial que describe el fenómeno físico, siendo la ecuación de onda, se torna muy compleja por su dependencia espacial y temporal (Kirkup, 2007). Por medio de la representación discreta que realiza el FEM a la geometría espacial, se obtienen sistemas de ecuaciones diferenciales lineales que permiten obtener una solución aproximada en función de la posición. El dominio discreto es una división conformada por

elementos, los cuales, están interconectados por nodos (Zienkiewicz & Taylor, 2000). A cada nodo se asocia un número de grados de libertad, que son el número de coordenadas capaces de describir el movimiento del nodo, por medio de ecuaciones de diferencias lineales. A partir de lo anterior, se construye una matriz con dichas ecuaciones, que luego se solucionan para hallar el potencial de velocidad, la velocidad de partícula y la presión sonora en cada nodo (Geaves & Henwood, 1996).

La interconexión de los elementos forma una red que se denomina malla. La malla se define por el tamaño, la topología y el orden de interpolación de los elementos. El tamaño está relacionado con la frecuencia y la longitud de onda. La topología hace referencia a la forma del elemento, que pueden ser líneas, triángulos, cuadrados, pirámides, hexaedros, entre otros. Existen dichas topologías, debido a que el método permite analizar geometrías de una, dos y tres dimensiones. El orden de interpolación es la cantidad de nodos que conforma cada elemento; se clasifica siendo lineal o cuadrático. Los elementos lineales son aquellos que están compuestos por un nodo en cada intersección de vértice. En cambio, los elementos cuadráticos, aparte de tener un nodo en cada intersección, tiene un nodo en medio de estos (Free Field Technologies SA, 2014).

Figura 2-9: Ejemplo de la simulación acústica, al interior de una turbina, realizada por el método de los elementos finitos FEM⁶.



Fuente: (Acosta, 2015)

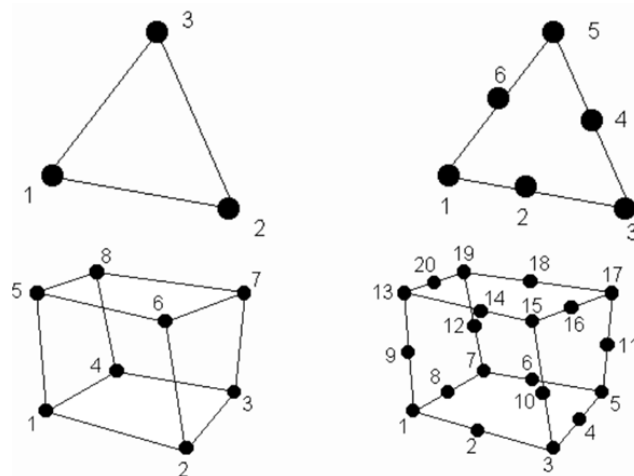
⁶ Figura a: campo acústico discreto con elementos de topología triangular y elementos de una dimensión, siendo la línea verde, azul y vino tinto. Figura b: simulación de la velocidad de partícula del modelo mostrado en la Figura a.

Los pasos que realiza el método de elementos finitos para abordar una simulación, son:

- Dividir la geometría en elementos discretos.
- Definir la topología y el orden de interpolación de los elementos.
- Asociar a cada nodo una ecuación de diferencia lineal.
- Construir la matriz con las ecuaciones de diferencias.

El método se ha empleado para calcular la presión sonora en cavidades acústicas cerradas (Kirkup, 2007) o la producida por un altavoz (Henwood et al., 1987), la impedancia acústica en sistemas de audio (Holland et al., 1991), la pérdida por transmisión TL en silenciadores con material absorbente (García & Ruíz, 2013), etc.

Figura 2-10: Topología y orden de interpolación de los elementos⁷.



Fuente: (Free Field Technologies SA, 2014)

Ciertos factores que influyen en la precisión del método son las condiciones aplicadas. Las condiciones son aplicadas a los dominios que forman el problema acústico total; como las aberturas, las paredes rígidas, las superficies vibrantes, etc. La condición de frontera es útil para discernir la

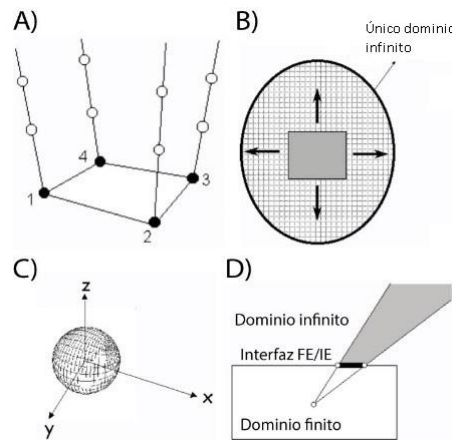
⁷ Lado superior izquierdo: elemento triangular con orden de interpolación lineal; está compuesto por tres nodos, uno en cada intersección de los vértices. Lado superior derecho: elemento triangular con orden de interpolación cuadrático; está compuesto por 6 nodos, uno para cada intersección de los vértices, y otro en el medio de dichos vértices. Lado inferior izquierdo: elemento cuadrangular con orden de interpolación lineal. Lado inferior derecho: elemento cuadrangular con orden de interpolación cuadrático.

ecuación diferencial que describe comportamiento del fluido en un punto determinado. Esto es visible en partes cercanas a límites rígidos, donde la velocidad de partícula tiende a cero, siendo la condición de pared rígida. A través de la condición de frontera, se puede simular la excitación sonora que produce una fuente acústica en un punto específico del campo acústico.

Otra condición relevante en una simulación acústica es la de *Sommerfeld*, la cual, establece la divergencia de una onda sonora al propagarse libremente. Al aplicar dicha condición, se puede representar el decaimiento energético de una onda sonora en función de la distancia. Sin la condición de *Sommerfeld* establecida en la simulación, los límites de la malla formada se asumen como superficies rígidas, produciendo que las ondas sonoras se reflejen hacia el interior del mismo (García & Ruíz, 2013). Programas de simulación como ACTRAN VI brindan la opción de aplicar esta condición por medio de los elementos infinitos IE.

Elementos infinitos – IE

Figura 2-11: Características de los elementos infinitos IE en el software de simulación ACTRAN VI⁸.



Fuente: (Free Field Technologies SA, 2014)

⁸ Figura A: en blanco, nodos infinitos generados a partir de los nodos, en negro, de la superficie base. Figura B: superficie radiante al interior del dominio infinito. Figura C: sistema de coordenadas de referencia para el dominio infinito; una esfera. Figura D: ilustración del dominio finito e infinito, y la interfaz FE/IE; elementos infinitos formados dependiendo del origen del dominio infinito y de la cantidad de nodos en dicha interfaz.

Son elementos que permiten modelar el campo sonoro en dominios sin fronteras, permitiendo representar la condición de campo libre. Estos elementos se caracterizan por tener nodos que sólo llevan un grado de libertad. Son definidos según la cantidad de nodos que tenga la superficie base y las propiedades definidas del dominio infinito. La superficie base resulta ser la interfaz entre los elementos finitos y los elementos infinitos; por ejemplo, el dominio asociado a una abertura. El software ACTRAN VI genera una cantidad de nodos infinitos total acorde al producto entre la cantidad total de nodos que tenga dicha interfaz y el orden de interpolación menos 1, parámetro ingresado por el usuario. Los elementos infinitos se caracterizan por tener una unidad de dimensión menor a la dimensión del dominio simulado con los elementos finitos.

El dominio infinito es la agrupación de los IE. Está definido por las siguientes propiedades: el material del dominio infinito; el orden de interpolación; el sistema de coordenadas elipsoidal de referencia. Los parámetros que definen dicho sistema de coordenadas son: el origen y los ejes principales. A raíz del sistema definido, se forma una superficie elipsoidal de referencia. Al interior de esta, el software de simulación genera los elementos infinitos.

Además de la condición de *Sommerfeld*, otro factor que influye en los resultados es el refinamiento de la malla; si los elementos tienen menor tamaño, la solución es más exacta. No obstante, se requiere mayor recurso computacional. Para determinar el refinamiento óptimo, en términos de la precisión y los recursos empleados, se debe realizar el estudio de convergencia de malla.

Estudio de convergencia de malla

La convergencia hace referencia al menor tamaño que deben tener los elementos, en función del orden de la interpolación, para que no ocurran diferencias en los cálculos de simulación al momento de cambiar las dimensiones de la malla. Con esto, se asegura que los resultados sean fiables. Para establecer la malla óptima, se efectúa un proceso denominado estudio de convergencia, que consiste realizar simulaciones, del dominio discreto en análisis, con elementos de diferentes tamaños. A medida que avanza el estudio, se reduce el tamaño de los elementos que conforman la malla; es decir, se hace un refinamiento. Luego, se determina cuál es el tamaño de los elementos, con los que los resultados de la simulación tienden a converger o tener un valor semejante (Mustafi, 2013). Por medio del estudio de convergencia, es posible evitar emplear más recursos computacionales de los requeridos, optimizando el tiempo de la simulación sin sacrificar la precisión de los cálculos.

En simulaciones acústicas, se define una cantidad de elementos por cada longitud de onda en análisis. Para elementos con orden de interpolación lineal, se suele establecer una cantidad de 6 a 10 elementos, y si dicho orden es cuadrático, la cantidad se reduce a la mitad. En otras palabras, se tiene en cuenta la cantidad de nodos que compone la longitud de onda en la malla (Marburg & Nolte, 2008). En simulaciones acústicas, el estudio de convergencia se efectúa comparando la variable requerida en el cálculo, que bien puede ser el patrón directivo, o la distribución de presión sonora, o la respuesta en frecuencia, versus la cantidad de grados de libertad de la malla generada (Mustafi, 2013) o del número de elementos por longitud de onda. También es posible evaluar variables de recursos computacionales como el tiempo empleado para la simulación y la memoria requerida (Acosta, 2015).

Método de los elementos finitos y bocinas.

Como se ha mencionado anteriormente, el FEM es útil para realizar simulaciones acústicas; su aplicación se extiende en diversos campos de la ciencia. Para los autores fue fundamental hacer una revisión de literatura sobre las investigaciones que han hecho uso del método para simular fenómenos acústicos en bocinas. Morita et al. (1979) simularon la radiación acústica y respuesta en frecuencia de un altavoz, en pantalla infinita, acoplado a seis bocinas diferentes, con perfiles de área transversales diferentes a las que surgieron con la teoría de Webster (1919), desde 800 Hz hasta 2 kHz. Por medio del método, lograron obtener los puntos donde se produce mayor menor presión sonora al interior de las bocinas. Kyouno et al. (1982) continuaron con el estudio descrito, analizando la distribución de la presión sonora, en campo lejano, generada por un altavoz con diafragma elástico y acoplado a 6 bocinas. Holland et al. (1991) predijeron la impedancia de la garganta de bocinas exponenciales, con diferentes tamaños, hasta 5 kHz.

En general, en las investigaciones se desarrollaron procedimientos analíticos similares. Con el fin de reducir la complejidad, causada por la dependencia temporal del sistema, se asumió un campo acústico armónico. Se asocia la ecuación diferencial parcial de Helmholtz a cada nodo, siendo una solución armónica de la ecuación de onda. El análisis se efectúa en términos del potencial de velocidad, permitiendo calcular la presión y la velocidad en cada nodo. Estos procesos matemáticos son tratados por paquetes de simulación numérica para acústica, como ACTRAN (Free Field Technologies SA, 2014). Las investigaciones lograron corroborar la precisión de los métodos numéricos, por medio de la comparación con mediciones experimentales. Demostraron que se

pueden calcular más variables, como la presión acústica, el patrón directivo, etc., en comparación con la teoría de Webster (Morita et al., 1979; Kyouno et al., 1982). Esto, permite que optimice el diseño de bocinas en términos de sus indicadores; respuesta en frecuencia, entre otras (Geaves and Henwood, 1996).

La respuesta en frecuencia de las bocinas, siendo conjunto de datos de la presión sonora en función de la frecuencia, puede caracterizarse y analizarse a través de métodos estadísticos.

2.2.6 Estadística

Estudia los métodos empleados en la recolección, organización, resumen, análisis e interpretación de los datos, para poder obtener validez de las conclusiones y tomar decisiones de forma razonable. La estadística, que tiene el propósito de analizar datos secuencialmente, se clasifica en dos categorías, la inferencial y la descriptiva. La primera mencionada, se deriva de la muestra u observaciones realizadas a una parte de la población, y busca establecer generalidades a partir de los datos obtenidos. La segunda descrita, tiene la finalidad de presentar los datos mediante tablas y gráficas, que permiten describir el comportamiento de los mismos sin realizar inferencias (Posada, 2016). Las medidas estadísticas descriptivas, aplicadas en esta investigación, son las siguientes:

Desviación estándar

La desviación estándar DE o σ indica la distribución de los datos alrededor de la media aritmética o promedio. Se calcula como la raíz cuadrada de la varianza poblacional σ^2 :

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2.17)$$

Donde N es el número total de datos, μ es la media aritmética del conjunto de datos y x_i es el valor de cada dato i , que en esta investigación, es la presión sonora de la respuesta en frecuencia.

Coefficiente de asimetría de Pearson γ

Es la relación entre la diferencia de la media aritmética \bar{x} y la moda M_o con respecto a la desviación estándar S , expresada en la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{\bar{x} - M_o}{S} \quad (2.18)$$

El coeficiente γ es un indicador de la tendencia que toma los datos hacia uno de los extremos, que en una respuesta en frecuencia, indica el sesgo que toman los picos y los valles de la presión sonora p . Si la RF se caracteriza por tener picos considerables, el coeficiente de asimetría es mayor a 0. Por el contrario, si la RF tiene valles significativos, el coeficiente γ es menor a 0. Si los picos y los valles de la presión p varían de manera semejante, respecto a la media aritmética, el coeficiente γ es aproximadamente cero.

Rango R

Es la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo del conjunto de datos analizados. Se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (2.19)$$

Si la muestra es la respuesta en frecuencia, el rango sirve para indicar la diferencia entre el pico y el valle de la presión sonora p .

A parte de las medidas estadísticas descriptivas, existen técnicas para comparar y analizar un conjunto de datos. Un método utilizado comúnmente es el ANOVA.

ANOVA

El análisis de la varianza ANOVA es una técnica útil para probar la hipótesis de si las medias aritméticas, de un número k de muestras, son iguales o, si de lo contrario, difieren por el efecto de un tratamiento aplicado. La hipótesis nula H_0 se acepta siempre que las medias μ de las muestras tengan unas medias semejantes μ_k (Expresión (2.20)). De lo contrario, se rechaza la hipótesis H_0 y se acepta una nueva hipótesis H_A , deduciendo que, por lo menos, uno de los tratamientos k tiene una media μ_k significativamente diferente (Expresión (2.21)).

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \quad (2.20)$$

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j \text{ para } i \neq j \quad (2.21)$$

Cuando se aplica el análisis de la varianza ANOVA, resulta ideal cumplir las siguientes condiciones para evitar realizar inferencias incorrectas (Lazar et al., 2017):

- Las k muestras analizadas deben ser independientes entre sí.
- Las muestras deben tener homogeneidad en sus varianzas, debido a que el ANOVA proporciona resultados más precisos de esta manera. Se suele emplear la prueba de Levene para confirmar la hipótesis de si la varianza de las muestras son iguales. Cuando no se cumple esta condición, se pueden usar técnicas de transformación, como los logaritmos y la reciprocidad de los datos originales con el fin de hacer más semejante las varianzas (Hamilton, 1990).
- La distribución de las muestras debe estar normalizada. Es decir, el conjunto de datos no debe presentar asimetría o un sesgo respecto a la media aritmética. Esta condición se cumple cuando las varianzas son homogéneas.

El análisis de la varianza es un método estadístico que permite estimar el efecto que producen unos tratamientos empleados en un grupo de muestras. Si existen diferencias significativas entre las medias aritméticas de las respuestas en frecuencia de las bocinas, medidas con y sin material absorbente, se puede corroborar que, por lo menos, uno de los materiales implementados produce un efecto.

Los resultados del ANOVA se interpretan a partir del estadístico F_o y del *valor - P* obtenido, y del nivel de significancia α establecido. Siguiendo la distribución de Fisher F , los grados de libertad df ($k - 1, N - k$) de los tratamientos y las N observaciones o frecuencias medidas, se rechaza H_o si el *valor - P* $< \alpha$, la hipótesis H_o se rechaza. De lo contrario, se acepta (Gutiérrez & de la Vara, 2012). El nivel de significancia α expresa el porcentaje de validez de los resultados. Normalmente se establece como 0.05, por lo cual lo obtenido tiene 95% de validez. Ya que el ANOVA separa de la variación total, la variación producida por el tratamiento y la producida por el error, otros resultados obtenidos con este análisis son la media de la suma de cuadrados CM de la variación generada por dichas fuentes.

La prueba de Levene, aplicada a las muestras analizadas con el ANOVA, da como resultado un *valor - P*, que si supera a un nivel de significancia α establecido, se demuestra la homogeneidad de las varianzas. A parte de esta prueba, se suelen emplear comparaciones múltiples, como el método

de *Tukey – Kramer*, para determinar la muestra que presenta la media aritmética significativamente diferente respecto al conjunto de muestras analizado.

Método de *Tukey - Kramer*

El procedimiento de *Tukey – Kramer* o la prueba de *Tukey HSD* es una técnica de comparación múltiple por pares, que tiene como propósito mostrar la diferencia honestamente significativa (*honestly significant difference, the HSD*), entre dos medias aritméticas usando una distribución estadística denominada *Studentized range distribution*, o también q .

A partir de la siguiente condición $|t|$ se determina si dos grupos, o RFs, i y j , tienen medias diferentes ($H_A: \mu_i \neq \mu_j$):

$$|t| = \frac{\mu_i - \mu_j}{\sqrt{\frac{1}{2} CM_E \left(\frac{1}{S_i} + \frac{1}{S_j} \right)}} > \frac{1}{2} q_{\alpha, k, N-k} \quad (\text{E.1})$$

Donde $q_{\alpha, k, N-k}$ es el percentil de la distribución *Studentized range*, en función del nivel de significancia α , del número de tratamientos k y de los grados de libertad $N - k$. El número de observaciones de cada grupo se denomina S_k , N son todas las observaciones del conjunto de grupo, la media de un grupo a se denota como μ_k y la media de la variación producida por el error, y obtenida con el ANOVA, es CM_E (Abdi & Williams, 2010).

3. Capítulo III. Diseño metodológico

3.1 Tipo y enfoque de investigación

Según Hernández Sampieri et al. (2010), un estudio cuantitativo es secuencial y probatorio. Comienza a partir de una idea general que se convierte en un problema delimitado y concreto. Se hace la revisión de la literatura en función del problema y se construye el marco teórico. Se definen variables a estudiar en función del planteamiento del problema y los objetivos. Las variables se miden con el fin de recolectar datos numéricos, y que luego, son analizados mediante métodos estadísticos. Se generan conclusiones procurando determinar una realidad objetiva.

El enfoque de esta investigación es cuantitativo; partió de verificar un método que corrigiera la irregularidad de una respuesta en frecuencia que puede presentarse en cualquier tipo de bocina, en cualquier rango de frecuencias, que luego resultaría consistiendo en determinar el efecto en la respuesta en frecuencia al implementar material absorbente en una bocina cónica, una bocina exponencial de Salmon y una bocina exponencial rectangular, desde 500 Hz hasta 5 kHz. Las variables, el coeficiente de absorción y la respuesta en frecuencia, siendo la variable independiente, se caracterizan por ser numéricas, por lo que resulta necesario emplear mediciones para recolectar datos que son analizados con métodos estadísticos. Después, se concluyen los resultados para determinar la realidad objetiva del efecto de implementar material absorbente en la respuesta en frecuencia de las bocinas elegidas en la investigación.

Según Hernández Sampieri et al. (2010), un experimento se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes dentro de una situación de control. Con esto, el investigador tratará de explicar el efecto de manipular una variable independiente sobre una variable dependiente, en comparación con la ausencia de una variable independiente o con otra establecida. La variable dependiente se caracteriza por medirse, con el propósito de determinar su

efecto dado por la variable independiente. Por medio del diseño, se cumplen los objetivos específicos de la investigación.

El tipo de esta investigación es experimental, debido a que se implementa material absorbente al interior de una bocina exponencial y cónica, para medir, observar y analizar la respuesta en frecuencia específica. La variable dependiente resulta ser la respuesta en frecuencia de cada bocina, mientras que la variable independiente es el material absorbente.

3.2 Recopilación de datos

La recopilación de los datos se efectúa por medio de una matriz que almacena los resultados de las respuestas en frecuencia medidas por cada bocina y los coeficientes de absorción de los cuatro materiales absorbentes. El instrumento aborda, en totalidad, las variables dependientes e independientes contempladas en el enfoque de la investigación.

Tabla 3-1: Matriz de recolección de datos definida en la investigación⁹.

Material absorbente	Coeficiente de absorción α						Respuesta en frecuencia		
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	BE de Salmon	BE Rectangular	BC
<i>Lowsound</i>	0.14	0.25	0.49	0.81	0.76	0.86	x	x	x
Acustiplaca	0.14	0.25	0.65	0.99	1	1	x	x	x
<i>Black Theater</i>	0.06	0.25	0.62	0.91	0.99	0.98	x	x	x
Acustifibra	0.03	0.22	0.69	0.91	0.96	0.99	x	x	x

Fuente: propia

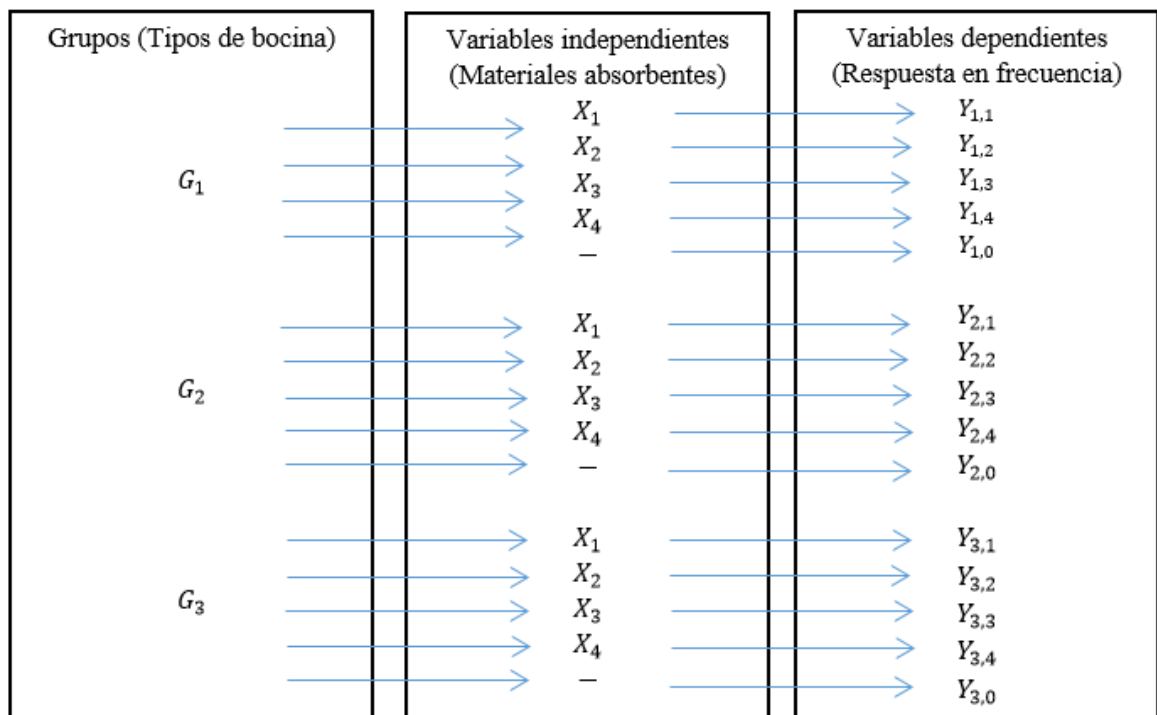
3.3 Variables o categorías de análisis

El grupo de estudio de la investigación son: la bocina cónica, la bocina exponencial rectangular y la bocina exponencial de Salmon, nombradas respectivamente como G_1 , G_2 y G_3 en el esquemático del tipo de la investigación. Las variables independientes son los cuatro materiales absorbentes X_n implementados al interior de la bocina: X_1 es la espuma de poliuretano *Lowsound*, X_2 es la lana de

⁹ Las siglas BE y BC significan Bocina Exponencial y Bocina Cónica, respectivamente.

roca “Acustiplaca”, X_3 y X_4 son las fibras de vidrio *Black Theater* y “Acustifibra”, respectivamente. El símbolo – representa la ausencia de material absorbente al interior de las bocinas en estudio. Las variables dependientes son las respuestas en frecuencias de las tres bocinas, medidas con y sin los materiales porosos a su interior. Reciben la abreviatura $Y_{n,m}$, donde n es el número asignado a una de las tres bocinas G_n y m es el número establecido a uno de los cuatro materiales absorbentes X_m . La relación de las variables del estudio, con sus abreviaturas, se muestran en la Figura 3-1. En el desarrollo ingenieril se describe detalladamente las características, tanto de las bocinas como de los materiales mencionados anteriormente.

Figura 3-1: Relación de las variables dependientes e independientes del estudio experimental.



Fuente: propia

4. Capítulo IV. Desarrollo ingenieril

En el trabajo de grado se abordaron diversos campos de la ingeniería de sonido, los cuales están relacionados con: el diseño de sistemas de sonido, la teoría y el desarrollo de las bocinas; la simulación numérica y el método de elementos finitos; la acústica arquitectónica y la utilización de los materiales absorbentes; el dibujo técnico, la modelación y la impresión 3D de sistemas de sonido; los fundamentos de acústica, el análisis estadístico y la programación.

En la sección del desarrollo ingenieril se explican los pasos requeridos para cumplir con los objetivos planteados. Se recurrieron a pasos que no lograron satisfacer ciertos parámetros, por lo cual, se modificaron para dar lugar a pasos que, finalmente, fueron esenciales para cumplir los objetivos. Los autores decidieron incluirlos en el ANEXO A del documento.

Se desarrolló un programa en el software MATLAB 2017b, el cual fue útil para realizar el diseño de las bocinas, así como el procesamiento y almacenamiento de los resultados. A lo largo de esta sección, se describe con exactitud cuáles fueron las funciones específicas de dicho programa. En el ANEXO B se explica cómo se llevó a cabo el desarrollo del programa.

4.1 Respuesta en frecuencia RF del *driver* de compresión

En la selección del *driver* de compresión se consideraron las siguientes características:

- Reproducir un rango de respuesta en frecuencia extendido, desde 500 Hz hasta 5 kHz.
- Tener un diámetro de garganta menor o igual a 5 centímetros con el propósito de desarrollar bocinas con dimensiones relativamente pequeñas; entre menor sea dicho diámetro, el tamaño de la bocina se reduce.

Acorde a lo anterior, y buscando un dispositivo asequible para los autores, se eligió el *driver* de compresión D3240TI, de la marca brasileña PRV Audio. Debido a que la investigación plantea

analizar la fluctuación de la respuesta en frecuencia RF de las bocinas, fue necesario obtener la RF del driver de compresión seleccionado, a través de su medición y caracterización. A continuación, se describe cómo se realizó dicho procedimiento.

4.1.1 Medición y caracterización de la respuesta en frecuencia del *driver* de compresión.

La literatura (Davis & Jones, 1989; Beranek, 1954) recomienda medir la respuesta en frecuencia de un sistema de sonido en un lugar libre de reflexiones sonoras. Con la ausencia de una cámara anecoica en las instalaciones, las mediciones de la RF del driver de compresión y de las bocinas desarrolladas en la investigación se realizaron en la cancha de fútbol de la Universidad de San Buenaventura Bogotá.

Para prescindir filtraciones en las mediciones de la RF:

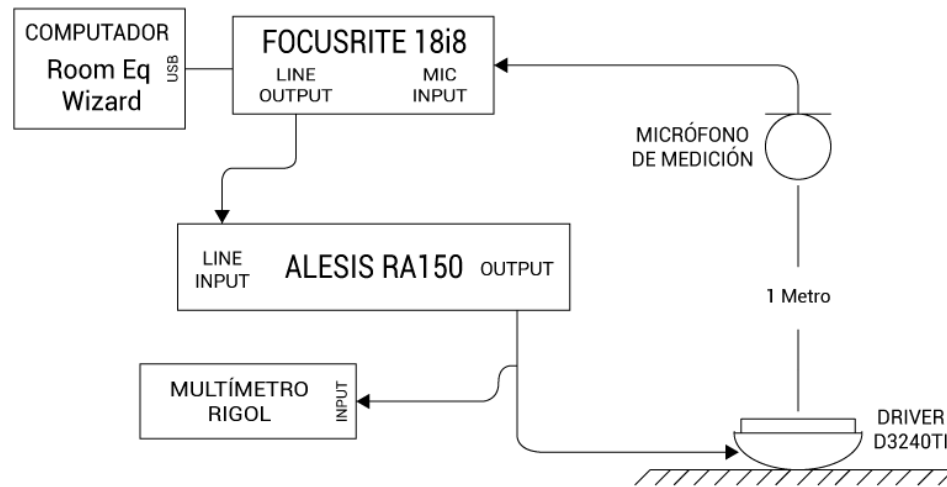
- Se tomó en consideración que el ruido de fondo fuera 20 dB menor al nivel de presión sonora obtenido en las frecuencias del análisis. Con esta diferencia, el valor del nivel de presión sonora, de la fuente medida, permanece constante al sumarse energéticamente con el ruido de fondo.
- Se colocó el driver de compresión con dirección hacia el cielo, mientras que el micrófono de medición se posicionó en axis con el sistema reproductor de sonido.

Los equipos de audio utilizados para la medición de la RF del driver de compresión D3240TI, con y sin bocina acoplada, son los siguientes:

- Interfaz de audio Focusrite 18i8.
- Amplificador de potencia ALESIS RA150.
- Computador con el software de medición ROOM EQ WIZARD - REW.
- Pistófono SVANTEK.

La conexión de los equipos mencionados se ilustra en la Figura 4-1.

Figura 4-1: Diagrama de conexión de los equipos utilizados en la medición de la RF del driver de compresión¹⁰.



Fuente: propia

Debido a que la configuración de la medición es experimental, se consideró que los resultados obtenidos con un solo micrófono pueden estar afectados por factores externos como: fallas en el funcionamiento del transductor, afectación por fuentes de ruido externas, el viento y la lluvia. Los autores plantean que las mediciones de RF con tres micrófonos brindan resultados más precisos y reales, respecto a las hechas con un solo micrófono, debido a que permite evaluar la diferencia de los resultados obtenidos con cada uno de los transductores y, así, determinar si están exentos de anomalías. Por tal razón, se realizó la medición de la respuesta en frecuencia RF del driver de compresión y de las bocinas con los micrófonos GOLD LINE TEF04, BEHRINGER ECM8000 y CROWN C150, los cuales se caracterizan por su respuesta en frecuencia plana, mostrada en el ANEXO H.

El procedimiento de medición de la RF fue el siguiente:

- Se calibró la tarjeta de sonido en el software de medición REW, con la configuración *loopback*, la cual es la conexión entre la entrada y la salida de línea de la interfaz Focusrite 18i8. Con esto, se

¹⁰ Se realizó la medición de respuesta en frecuencia por cada uno de los tres micrófonos utilizados, a la vez. La ubicación de estos transductores fue la misma. La potencia de la señal de entrada es de 0.24 W.

verifica la linealidad de la tarjeta de sonido, la cual, la respuesta no presenta variaciones de más de 1 dB entre el rango de frecuencias del análisis. Esta medición se muestra en el ANEXO I.

- Cada vez que se utilizaba uno de los tres micrófonos, se calibraba con el pistófono SVANTEK a 94 dB SPL. Con esta calibración, se determina el nivel de amplitud que suministra el REW cuando se está midiendo 94 dB SPL, el cual se estableció como -20 dBFS.
- Se configuró las propiedades de medición del software, las cuales se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Configuración establecida en las mediciones con el software Room EQ Wizard.

Rango de frecuencias	450 Hz hasta 10 kHz
Señal utilizada	Barrido sinusoidal logarítmico – <i>Sine Sweep</i>
Cantidad de barridos sinusoidales	4
Numero de muestras en la secuencia del barrido sinusoidal	256000
Tiempo empleado	23,8 segundos

Fuente: propia

Teniendo en cuenta la variación del ruido de fondo producido en el lugar de la medición, se estableció la máxima cantidad (4) de barridos sinusoidales, las cuales el programa REW realiza un promedio energético del SPL obtenido.

- El software REW muestra los resultados de la medición en pantalla. Dichos resultados son exportados en un archivo .txt para ser procesados en el programa desarrollado en MATLAB 2017b.

En la Figura 4-2 se muestra la RF medida del driver de compresión. En el ANEXO I se ilustra el ruido de fondo.

4.1.2 Ajuste de la RF del *driver* de compresión.

Como se puede observar en la Figura 4-2, la RF del *driver* de compresión presenta fluctuaciones en el rango de frecuencias de análisis. Lo ideal, es que dicha respuesta sea lineal, sin presentar variaciones, debido a que así se obtiene el rizado de la RF causado únicamente por las bocinas.

Durante el desarrollo de la investigación se establecieron dos procedimientos para hacer lineal la RF del driver de compresión. El primero consistió en ecualizar la respuesta en frecuencia de dicho driver a través de filtros paramétricos disponibles en el procesador digital de señal dBX Venu360. Aunque el rizado de la RF del D3240TI disminuía después de aplicar los filtros paramétricos, su fluctuación aún era significativa, siendo mayor a 3dB. Por ende, se descartó este procedimiento, el cual se describe con más exactitud en el ANEXO A.

Con lo mencionado anteriormente, fue necesario recurrir a un segundo procedimiento. Éste consistió en promediar aritméticamente la presión sonora p . Para esto, los valores logarítmicos del nivel de presión sonora SPL, obtenidos por cada frecuencia i , se convirtieron a valores lineales, tal como se ilustra en la ecuación (4.1).

$$p_i = 10^{\frac{SPL_i}{20}} * p_{ref} [Pa] \quad (4.1)$$

Siendo p_{ref} , o la presión sonora de referencia, equivalente a $20\mu [Pa]$. Luego, se realiza el promedio aritmético de la presión sonora p_i :

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i) [Pa] \quad (4.2)$$

Donde N es la cantidad de frecuencias promediadas, siendo equivalente a 161 para la configuración del software de medición *Room Eq Wizard*, ilustrada en la Tabla 4-1. Luego de obtener lo descrito con antelación, el valor promedio de la presión sonora se convirtió a nivel de presión sonora:

$$\overline{SPL} = 20 * \log_{10} \left(\frac{\bar{p}}{p_{ref}} \right) [dB] \quad (4.3)$$

Después, se determinó cuánto debía aumentar o disminuir el SPL, en cada frecuencia, para que su valor fuera equivalente al valor promedio \bar{x} .

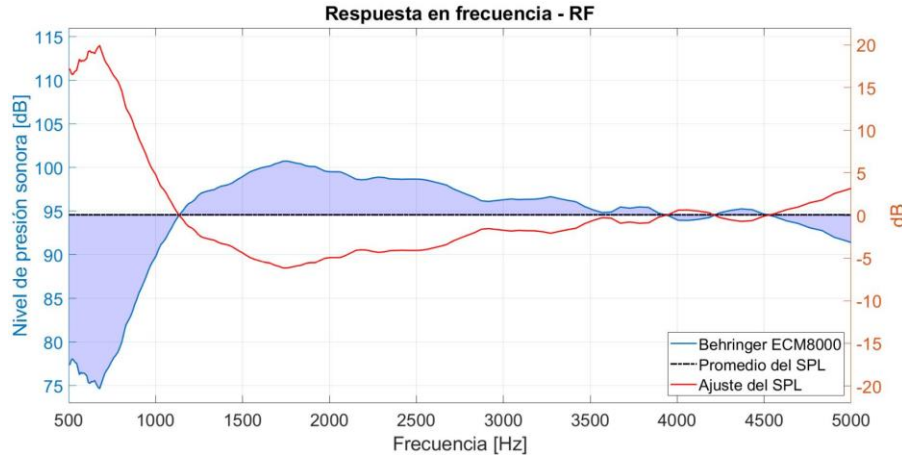
$$SPL_{adj,i} = SPL_i - \overline{SPL} [dB] \quad (4.4)$$

$$SPL_{RF,i} = SPL_{rf,i} - SPL_{adj,i} [dB] \quad (4.5)$$

Como se indica en la ecuación (4.4) y (4.5), si el nivel de presión sonora del driver de compresión SPL_i , en una frecuencia específica, es mayor al promedio \overline{SPL} , el ajuste $SPL_{adj,i}$ es una disminución. De lo contrario, si SPL_i es menor que \overline{SPL} , el ajuste es un incremento.

Independientemente de la bocina, con y sin material absorbente, su respuesta en frecuencia medida $SPL_{rf,i}$ se suma con el ajuste hecho en cada frecuencia $SPL_{adj,i}$, tal como se muestra en la ecuación (4.5). Con esto, se logra obtener la respuesta en frecuencia $SPL_{RF,i}$ de las bocinas sin fluctuaciones del *driver* de compresión.

Figura 4-2: Respuesta en frecuencia medida del driver de compresión D3240TI¹¹.



Fuente: propia

Luego, se calculó el coeficiente de variación C_v de las RF medidas con los tres micrófonos, y del C_v hallado entre las mediciones de RF hechas por cada micrófono, repetidas en tres días diferentes. Para calcular el coeficiente de variación, como se hizo con la ecuación (4.1), fue necesario expresar los niveles de presión sonora, que son valores logarítmicos, a presión sonora, los cuales son lineales. Luego, se calcula la desviación estándar típica s de la presión sonora. La desviación estándar s típica, para datos uniformemente distribuidos, se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} [Pa] \quad (4.6)$$

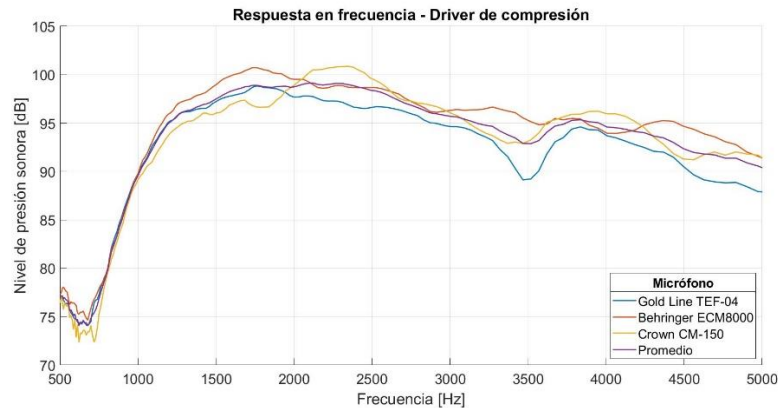
¹¹ En la Figura se ilustra la respuesta en frecuencia medida con el micrófono Behringer ECM8000, el primer día. La línea negra punteada representa el promedio energético del nivel de presión sonora de la RF medida, el cual equivale a 94.57 dB. La línea roja corresponde al ajuste realizado a las respuestas en frecuencia medidas con el micrófono Behringer ECM8000.

Donde n es el número de datos, siendo equivalente a 3, \bar{p} es la presión sonora promedio y p_i es la presión sonora obtenida por cada micrófono y/o repetición. Después, se determina el coeficiente de variación por medio de la siguiente ecuación:

$$C_v = \left(\frac{s}{\bar{p}} \right) * 100 [\%] \quad (4.7)$$

El coeficiente de variación es una medida que permite evaluar la dispersión de la presión sonora de las RF, por cada frecuencia específica, entre dos o más mediciones realizadas en un instante de tiempo diferente. En la Figura 4-3 se ilustran las RF obtenidas con los tres micrófonos, en la primera medición. En la Figura 4-4 se muestra el coeficiente de variación calculado entre las RF medidas con el *driver* de compresión.

Figura 4-3: Respuesta en frecuencia medida con el driver de compresión D3240TI, con los tres micrófonos utilizados en la investigación¹².

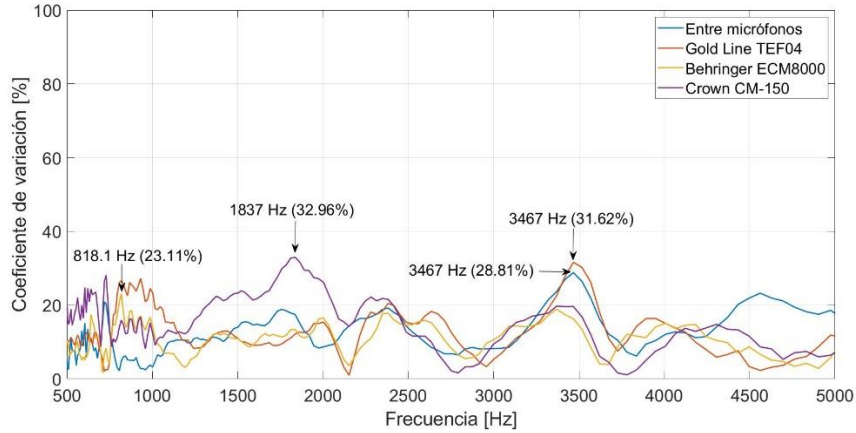


Fuente: propia

Como se puede ilustrar en la última Figura mencionada, el micrófono con el menor coeficiente de variación es el Behringer ECM8000, con un C_v máximo de 23.11% en 818.11 Hz. Por otro lado, el promedio del coeficiente de variación, obtenido con cada uno de los micrófonos, es: 13.08%, con el Gold Line TEF04; 10.79%, con el Behringer ECM8000; 15.97%, con el Crown CM150. Por haber generado los coeficientes de variación más bajos, se determina que el micrófono más adecuado para la medición de la RF, con y sin material absorbente, es el Behringer ECM8000.

¹² En morado se muestra el promedio energético de las respuestas en frecuencia obtenidas con los tres micrófonos.

Figura 4-4: Coeficiente de variación entre las RF del *driver* de compresión D3240TI, obtenidas con las repeticiones y con los micrófonos.



Fuente: propia

4.2 Diseño de las bocinas

Como se contempla en los objetivos de esta investigación, los tipos de bocinas a analizar son la cónica y la exponencial. Estas surgen a partir de la teoría unidimensional de Webster, descrita en la sección “**Teoría de bocinas**” del documento, caracterizándose por tener un perfil de área definido por el área transversal $S(x)$ y una forma de sección transversal establecida por el diseñador. En el estudio, se plantean las bocinas indicadas en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Bocinas desarrolladas en la investigación.

Bocina	Perfil de área	Forma de sección transversal
G_1	Cónica	Salmon
G_2	Exponencial	Rectangular
G_3	Exponencial	Salmon

Fuente: propia

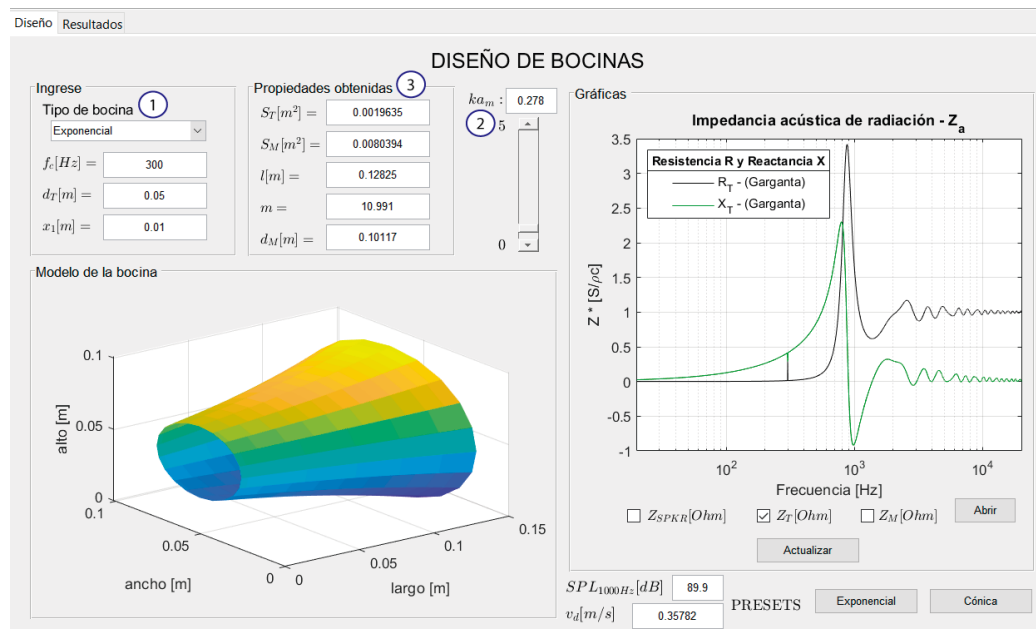
La teoría evidencia que las bocinas con perfil exponencial se caracterizan por reproducir un rango de frecuencias más amplio que las bocinas cónicas, como se puede observar con la impedancia acústica de la garganta mostrada respectivamente en la Figura 2-3 y en la Figura 2-5. Por tal razón, se desarrolla una mayor cantidad bocinas exponenciales.

Debido a que la propagación de ondas estacionarias al interior de las bocinas depende de la forma de la sección transversal, se plantean las siguientes dos bocinas exponenciales: la primera, con sección transversal rectangular, y la segunda, con sección transversal circular, siendo *axisymmetric*.

4.2.1 Cálculos de las medidas y dimensiones de las bocinas

Los diseños de las bocinas en estudio se realizaron según las ecuaciones explicadas en la sección “Tipos de bocina.” del documento. Debido a que dicho diseño fue un proceso iterativo, es decir, tuvo que realizarse varias veces para obtener los finales, se decidió desarrollar una interfaz gráfica en el software MATLAB 2017b, útil para realizar los cálculos correspondientes. A parte de determinar las dimensiones de las áreas y la longitud de las bocinas, el programa calcula y muestra la impedancia acústica Z_T . Además, muestra un dibujo en 3D de la bocina diseñada, tal como se ilustra en la Figura 4-5.

Figura 4-5: Interfaz gráfica del programa, desarrollado en MATLAB 2017b, para efectuar el diseño de las bocinas.



Fuente: propia

Los pasos realizados para efectuar los diseños de las bocinas son los siguientes:

- Los autores definen la frecuencia de corte f_c , de la impedancia acústica Z_T , y el diámetro de la garganta d_T . Este último es equivalente a 0.05 metros, ya que es el d_T que requiere el driver de compresión elegido en la investigación. En el caso del diseño de la bocina cónica, los autores también definen la distancia x_1 . Estos valores son ingresados en la sección indicada con el número 1, en la Figura 4-5.
- En la sección señalada con el número 2 de la misma Figura, se define el valor numérico y de la relación experimental que Keele (1973) estableció para obtener el tamaño óptimo de la boca. Esta relación, la cual es el producto entre el número de onda k_c y el radio de la boca a_m , influye en el rizado de la impedancia acústica de la garganta Z_T y de la respuesta en frecuencia RF.

$$y = k_c * a_m \quad (4.8)$$

Acorde a lo explicado en la sección **“Irregularidades o fluctuaciones en la respuesta en frecuencia de una bocina.”**, los autores en los diseños establecieron una relación menor a 1 con el fin de aumentar el rizado de la RF en las bocinas. Con lo anterior, también se logra conseguir dimensiones más reducidas en las bocinas, pues el radio de la boca disminuye. Si bien, Keele aplicó dicha relación en bocinas exponenciales, en esta investigación también se utilizó para el diseño de la bocina cónica, logrando aumentar el rizado con éxito.

- El algoritmo calcula el radio de la boca, teniendo en cuenta el valor numérico y de la relación $k_c * a_m$. Es decir, determina dicho radio a través de la expresión matemática (4.9).

$$a_m = \frac{y}{k_c} [m] \quad (4.9)$$

- El área de la garganta S_T y de la boca S_M son calculadas teniendo en cuenta los radios a correspondientes:

$$S = \pi * a^2 [m^2] \quad (4.10)$$

- En términos de la bocina exponencial, el programa determina el factor de ensanchamiento m , considerando la frecuencia de corte f_c y la velocidad del sonido c :

$$m = \frac{4\pi f_c}{c} \quad (4.11)$$

Posteriormente, se calcula la longitud de la bocina, despejando su respectiva variable x_e de la ecuación (2.6).

$$x_e = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{S_M}{S_T} \right) [m] \quad (4.12)$$

- En el caso de la bocina cónica, la longitud x_c se obtiene a través de la ecuación:

$$x_c = x_1 \sqrt{\frac{S_M}{S_T}} [m] \quad (4.13)$$

En la sección indicada con el número 3, de la Figura 4-5, se muestran los valores obtenidos con los cálculos descritos previamente (Propiedades obtenidas). Asimismo, el programa muestra un dibujo en tres dimensiones de la bocina diseñada, según las medidas anteriores.

Tabla 4-3: Parámetros asignados y obtenidos de las bocinas diseñadas en la investigación.

Parámetros y propiedades	Bocina exponencial (Salmon y Rectangular)	Bocina cónica (Salmon)
Frecuencia de corte f_c [Hz]	300	1000
Distancia x_1 [m]	No aplica	0.075
Relación $k_c * a_m$	0.278	0.85
Área de la garganta S_T [m ²]	0.0019635	0.0019635
Área de la boca S_M [m ²]	0.0080394	0.0067642
Longitud x [m]	0.12825	0.1392
Factor de ensanchamiento m	10.991	0
Diámetro de la boca d_M [m]	0.10117	0.092803

Fuente: propia

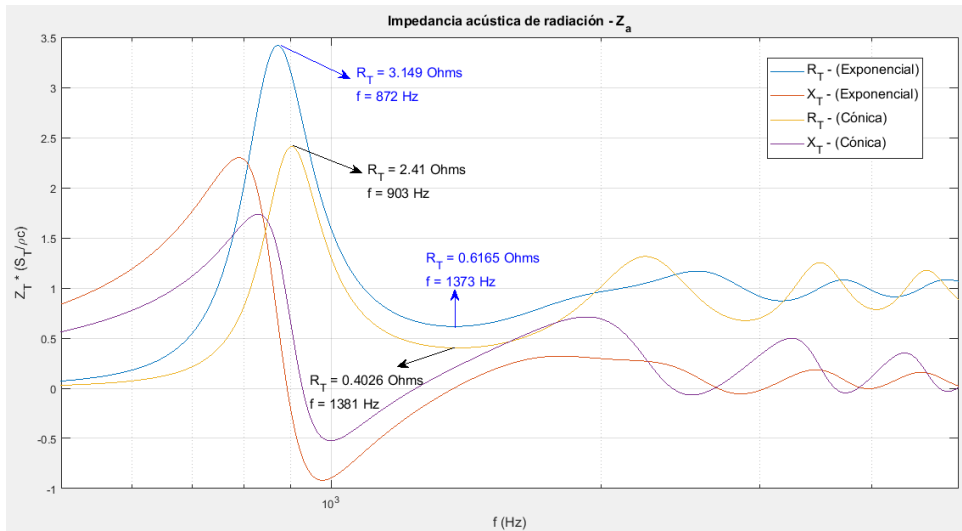
4.2.2 Predicción de la impedancia acústica de la garganta.

Como se mencionó anteriormente, el programa calcula y muestra la impedancia acústica de la garganta en función de la frecuencia. Esto se lleva cabo por medio de un algoritmo, el cual modela la ecuación respectiva de Z_T , siendo la ecuación (2.8) para bocinas exponenciales y la ecuación (2.13) para bocinas cónicas. Estas expresiones matemáticas dependen de los parámetros ingresados y de las propiedades obtenidas en los diseños. El programa ilustra la impedancia Z_T normalizada con el área de la garganta S_T por la impedancia característica $\rho_o c$ en cada diseño realizado.

Teniendo en cuenta que la resistencia acústica R_T es la cantidad de energía disipada en el medio o, dicho de otro modo, la energía convertida en sonido, se tiene en cuenta su fluctuación entre el rango de frecuencias establecido en la investigación. Como se observa en la Figura 4-6, las flechas, de color azul para la bocina exponencial y de color negro para la bocina cónica, indican el valor máximo y mínimo de la R_T . Debido a que la gráfica mencionada es una ilustración del acople de impedancias entre la bocina y el medio, los picos generados en ciertas frecuencias resultan ser distorsiones, mientras que los valles son disminuciones del nivel de presión sonora. En dicha Figura, se puede observar que a partir de 2 kHz el rizado de la impedancia normalizada disminuye, tendiendo ser igual a 1. Las frecuencias, en las que se evidencian mayor afectación por el rizado de la R_T , se indican en la Tabla 4-4.

A partir del comportamiento fluctuante de las impedancias acústicas Z_T calculadas anteriormente, en el rango de frecuencias desde 500 Hz hasta 5 kHz, se decide utilizar los diseños de las bocinas descritos en esta sección. Una vez establecidas las bocinas de la investigación, se seleccionan los materiales absorbentes a utilizar.

Figura 4-6: Ilustración de la impedancia acústica de la garganta Z_T , de la bocina cónica y exponencial, desde 500 Hz hasta 5000 Hz.



Fuente: propia

Tabla 4-4: Propiedades de la resistencia acústica de la garganta R_T obtenidas en las bocinas diseñadas en la investigación.

Bocina	Máximo R_T		Mínimo R_T		Variación de R_T (Ohm)
	Frecuencia f (Hz)	Resistencia R_T (Ohm)	Frecuencia f (Hz)	Resistencia R_T (Ohm)	
Exponencial (Salmon y Rectangular)	872	3.149	1373	0.6165	± 2.5325
Cónica	903	2.41	1381	0.4026	± 2.0074

Fuente: propia

4.3 Elección del material absorbente

Se decidió utilizar cuatro materiales absorbentes, disponibles en el mercado nacional, los cuales se diferencian por sus coeficientes de absorción y su densidad. Uno de los materiales, distribuido por la empresa Aqstica, es una espuma flexible sintética de poliuretano denominada *Lowsound*. Se caracteriza por su resistencia a la deformación elástica. Es utilizado comúnmente para la absorción de frecuencias medias y altas en estudios de grabación.

El segundo material, distribuido por la empresa Calorcol, se llama “acustiplaca”. Está fabricado con lana mineral de roca aglomerada. Es rígida e hidrófuga, o dicho de otro modo, evita la humedad. Los dos materiales restantes, distribuidos por *Fiberglass*, son fibras de vidrio aglomeradas con resina termo – resistente. Uno de estos recibe el nombre de *Black Theater*, mientras que el otro se llama “acustifbra”. Estos últimos tres materiales mencionados se usan comúnmente como revestimiento en muros, paredes y cielo raso, para el control de ruido, el aislamiento acústico y térmico.

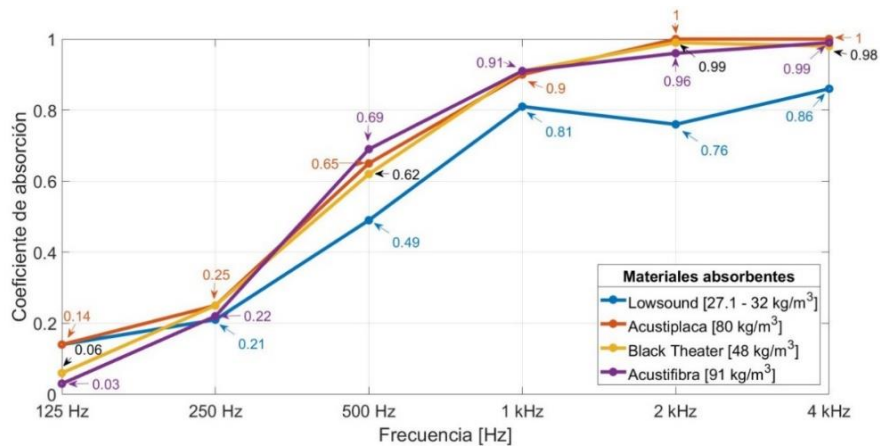
Los coeficientes de absorción y la densidad de estos cuatro materiales porosos son obtenidos con la hoja de datos entregada por cada fabricante. Sus valores son ilustrados en la Figura 4-8. El espesor de todos los materiales utilizados es equivalente a 1 pulgada. En la Figura 4-7 se pueden observar las muestras respectivas de cada material.

Figura 4-7: Muestras de los cuatro materiales absorbentes implementados en las bocinas¹³.



Fuente: propia

Figura 4-8: Coeficiente de absorción y densidad de los cuatro materiales porosos utilizados en la investigación¹⁴.



Fuente: propia

4.4 Simulación acústica con el método de los elementos finitos

La simulación numérica se llevó a cabo con el fin de visualizar el comportamiento del campo acústico, al interior y exterior de la bocina, en términos de la presión sonora p y la velocidad de partícula v . Al simular el campo acústico, se pudo determinar los puntos donde se producen máximos de v , en función de la frecuencia, y así resultó posible establecer la ubicación de los materiales absorbentes al interior de la bocina.

¹³ Los materiales, según la abreviatura asignada, son los siguientes: *Lowsound* (X_1), *Acustiplaca* (X_2), *Black Theater* (X_3) y *Acustifibra* (X_4).

¹⁴ Con números y flechas se indican los coeficientes de absorción α por cada banda de octava de frecuencia.

Para realizar la simulación numérica, fue necesario efectuar los siguientes pasos; hacer el dibujo de la geometría de las bocinas en 2D y 3D con el software AutoCAD 2017; importar los dibujos en ICEM, módulo de mallado disponible en el software de simulación ANSYS 18; importar el mallado para solucionar el modelo matemático en el software de simulación de elementos finitos ACTRAN VI, versión estudiantil. Esta versión es gratuita, caracterizándose por su limitación en la cantidad de grados de libertad DOFs (*degrees of freedom*, en inglés) a resolver y, por ende, en la cantidad de elementos que el modelo puede tener. La limitación para modelos de dos dimensiones es igual a 5000 DOFs, y para tres dimensiones es de 33000 DOFs. Para simular adecuadamente, los autores recurrieron a diversos pasos que están explicados a lo largo de esta sección.

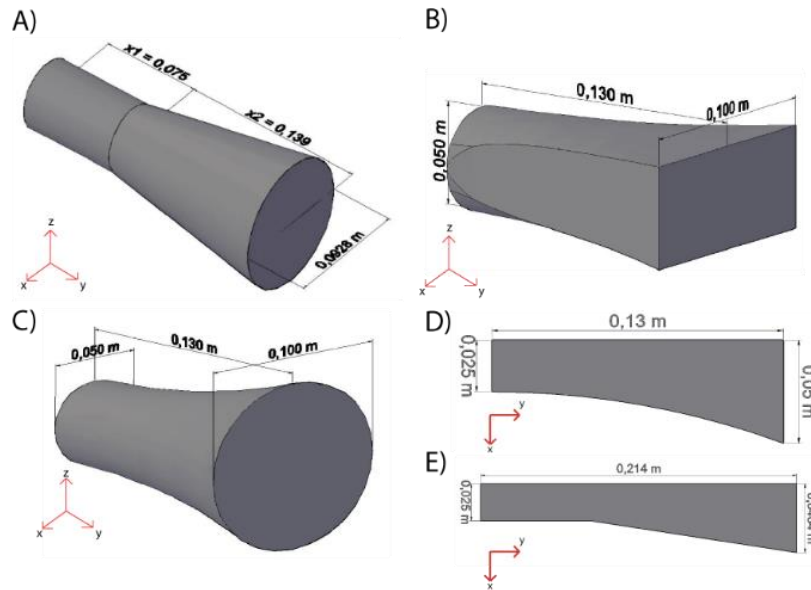
4.4.1 Modelación geométrica de las bocinas en dos y tres dimensiones.

Con el fin de simular el campo acústico al interior de las bocinas, la geometría dibujada debe corresponder al volumen de aire ocupado a su interior. Dichas geometrías son ilustradas en la Figura 4-9. Las características de las geometrías de cada bocina son las siguientes:

En general, es un sólido que se expande, desde la abertura de la garganta hasta la boca. El diámetro de la garganta es equivalente a 0.05 metros en todas las bocinas.

- La bocina cónica, mostrada en la imagen A y E de la Figura 4-9, presenta un ensanchamiento en todos sus ejes; su forma de sección transversal es circular. Desde la abertura de la garganta hasta la distancia x_1 , el área transversal de la bocina es constante, formándose un tubo. Desde x_1 hasta x_2 , la bocina presenta un aumento lineal en su área transversal, teniendo forma de cono.
- El ensanchamiento de la bocina exponencial rectangular se presenta sólo en el eje horizontal. Como se puede observar desde una perspectiva lateral, en la imagen B, la altura de la bocina se mantiene constante, siendo de 0.05 metros. En cambio, el ancho en la abertura de la boca es de 0.1 metros.
- En el caso de la bocina exponencial de Salmon, ilustrada en la imagen C y D, el ensanchamiento se efectúa en el eje horizontal y vertical. Es decir, su forma de sección transversal es circular. El diámetro de la boca es de 0.1 metros.

Figura 4-9: Modelos geométricos de las bocinas, correspondientes con el volumen de aire ocupado al interior¹⁵.



Fuente: propia

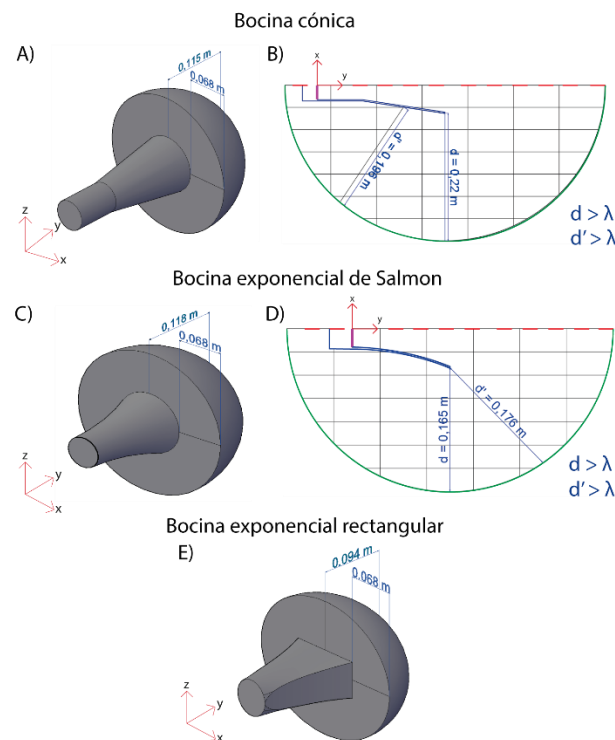
Después de modelar el campo acústico al interior de las bocinas, se determina la condición para simular la radiación acústica exterior. Con base en lo anterior, el software ACTRAN VI brinda la opción de simular dicho campo acústico por medio del componente de los elementos infinitos IE. Este componente debe asociarse con el contorno de una circunferencia, en un modelo de dos dimensiones, y de un elipsoide, en un modelo de tres dimensiones, adherido a la boca del modelo geométrico de la bocina. Dicho contorno es una malla que resulta ser la interfaz de los elementos finitos – infinitos. Como se mencionó en la sección “**Elementos infinitos – IE**”, la cantidad de nodos de los elementos infinitos es establecida dependiendo del número de grados de libertad, de la interfaz base, y del orden de interpolación, parámetro explicado más adelante. Para que el software ACTRAN VI simule con satisfacción la radiación acústica externa, la circunferencia, en un modelo de dos dimensiones, o el elipsoide, en un modelo de tres dimensiones, debe cubrir el área de la abertura del modelo, que en este caso, es la boca de la bocina.

¹⁵ Figura A, B y C: modelos en 3D. Figuras D y E: modelos en 2D. Todas las acotas están expresadas en metros.

En la investigación, se plantearon diversos modelos geométricos, los cuales están mostrados en la Figura 4-10. Para las tres bocinas, se realizó un modelo en tres dimensiones. Para la bocina exponencial de Salmon, y la bocina cónica, se planteó un modelo en dos dimensiones. Esta condición permite que el software de simulación ACTRAN VI asuma que la forma del modelo sea equivalente, tanto en el eje y como el eje z .

La diferencia entre los modelos de dos dimensiones, respecto a los de tres dimensiones, radica en que los primeros mencionados se caracterizan por generar menor cantidad de elementos finitos y, por ende, un menor número de nodos y de grados de libertad. Gracias a esto, los modelos en 2D cumplen con la relación de distancias que debe haber entre el contorno de la circunferencia, o la interfaz de elementos finitos e infinitos, y las paredes rígidas de la bocina. Dicha distancia debe ser mayor a dos veces la longitud de onda λ de la frecuencia máxima a simular, es decir, 5000 Hz, con el fin de evitar efectos de difracción (Free Field Technologies SA, 2014). En la Figura 4-10, tanto para la Figura B de la bocina cónica, y para la Figura D de la bocina exponencial de Salmon, se evidencia que la distancia es mayor a 0.1372 m.

Figura 4-10: Modelos geométricos de las bocinas utilizados en la simulación numérica.



Fuente: propia

4.4.2 Desarrollo de las mallas en los modelos geométricos de las bocinas.

Después de modelar geométricamente las bocinas desarrolladas en la investigación, se convierte su dominio continuo a uno discreto a través del método de los elementos finitos. Es decir, se genera la malla que será útil para que el software ACTRAN VI simule el campo acústico acorde al dominio discreto. Este paso se realizó en ICEM CFD, paquete de generación de mallas compuesto en el software de simulación ANSYS. Con el fin de que ICEM reconozca los modelos realizados en AutoCAD, fue necesario exportar los archivos de dibujo CAD en el formato de intercambio digital de información IGES.

Una vez los modelos de las bocinas estén importados en ICEM, se definen las propiedades de las mallas que son: los dominios en una, dos y tres dimensiones; la topología, el tamaño y el orden de interpolación de los elementos. Por medio de los dominios, se pueden establecer las propiedades de los materiales y las condiciones que hacen parte del fenómeno físico a simular. Con la topología y el tamaño de los elementos, se determina la frecuencia máxima del análisis. A continuación, se hace una descripción de los pasos empleados para generar las mallas en los modelos.

En ICEM CFD, los dominios reciben el nombre *parts*. En el software, es posible seleccionar las líneas, los contornos, las superficies y los volúmenes, con el fin de asignar su respectivo dominio. Los dominios se concretaron de la misma manera en las tres bocinas, designados como *inlet*, *outlet* y *part_1_1_1*. La parte *inlet* es el dominio asignado a la abertura de la garganta. *Outlet* es el dominio definido en la interfaz de los elementos finitos – infinitos. *Part_1_1_1* corresponde al dominio que corresponde con el volumen de aire al interior de la bocina.

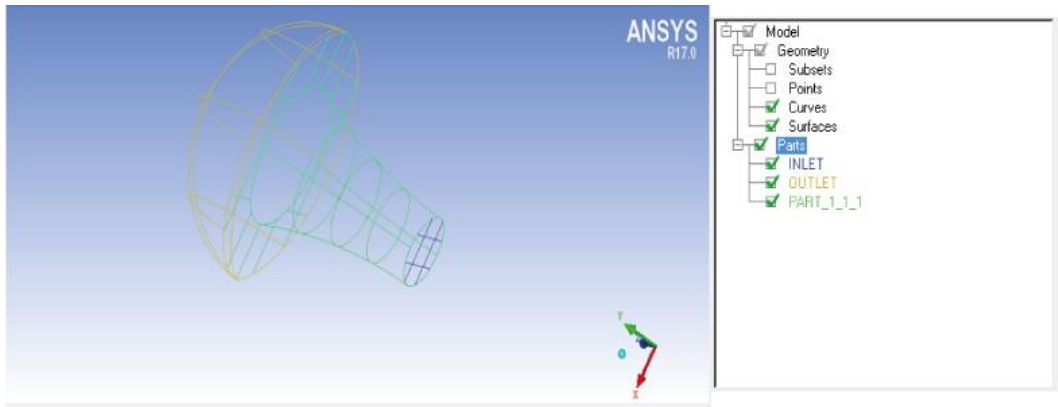
Después de asignar los dominios, se forma la malla definida según la topología, el tamaño y el orden de interpolación de los elementos. ICEM cuenta con una variedad de topologías para elegir; triángulos, cuadrados, tetraedros, hexaedros, etc. Por otro lado, el tamaño de los elementos l es definido según la longitud de onda λ_c de la frecuencia máxima a analizar, que en esta investigación es igual a 5000 Hz. Es decir, para que la simulación funcione entre el rango de frecuencias en análisis, la longitud l debe ser igual a λ_c sobre una cantidad N de elementos, como lo ilustra la ecuación (4.14). Para determinar N , se tiene en cuenta el orden de interpolación, lineal y cuadrático, teniendo la segunda una mayor cantidad de nodos por cada elemento respecto a la primera. Con un mayor

número de nodos, la simulación tiende a ser más verídica. Por tal razón, los elementos cuadráticos tienden a ser más grandes que los lineales, requiriendo una menor cantidad N

$$l = \frac{\lambda_c}{N} [m] \quad (4.14)$$

Teniendo en cuenta lo anterior, y con el propósito determinar el tamaño óptimo de los elementos, fue necesario efectuar el estudio de convergencia de malla. Es decir, para cada bocina, se realizaron varias simulaciones numéricas disminuyendo el tamaño de los elementos finitos. Una vez se encuentre que los resultados de la simulación no presentan diferencias, y teniendo en cuenta el tiempo empleado por la herramienta computacional utilizada, se define el tamaño de los elementos y su cantidad N por la longitud de onda λ_c . Este proceso de convergencia es detallado en el ANEXO C. En esta sección se mencionan las longitudes y cantidades definidas por dicho estudio.

Figura 4-11: Dominios asignados en el modelo de tres dimensiones de la bocina exponencial de Salmon.



Fuente: propia

Tabla 4-5: Propiedades de los elementos finitos que conforman los dominios de los modelos, en dos y tres dimensiones, de las bocinas.

Bocina	Dominio	Topología	Orden de interpolación (FE)	Longitud l (m)	Cantidad N de elementos por λ_c
Cónica	Inlet	Triángulo	Lineal	0,00686	10
	Outlet				
Exponencial (Rectangular)	Part_1_1_1	Tetraedro			
Exponencial (Salmon)					

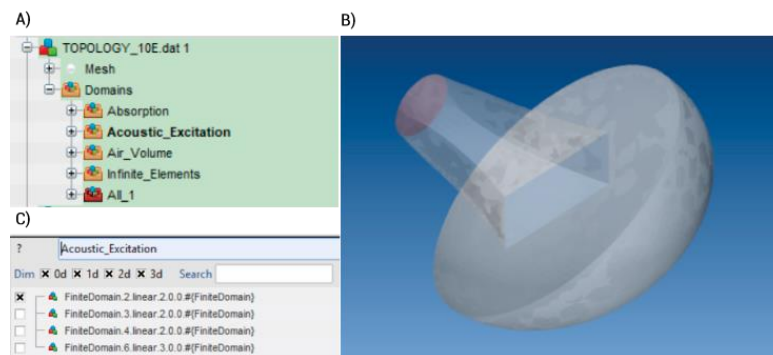
Fuente: propia

Luego de ser generadas, las mallas son exportadas como archivos de información .DAT, con el fin de que sean leídas por el software ACTRAN, programa útil para hacer el pre - procesamiento y el post – procesamiento de la simulación, así como la solución del modelo matemático que modela el fenómeno físico.

4.4.3 Pre – procesamiento de la simulación numérica

En el ANEXO J se ilustran todas configuraciones realizadas en la interfaz gráfica GUI del software ACTRAN VI de los pasos descritos en esta sección. En el apartado, se explica la asignación de las condiciones de contorno y las propiedades de los materiales. Esta información se muestra en la sección del árbol de topologías ubicada al lado izquierdo de su interfaz gráfica. Al comenzar, se debe verificar que la cantidad de dominios detectada por éste programa sea igual a la definida en la generación de malla. Como se ilustra en la Figura 4-12, para el modelo en 3D de la bocina exponencial de Salmon existen tres dominios, siendo *Infinite_Elements* y *Acoustic_Excitation* en dos dimensiones, y *Air_Volume* en tres dimensiones.

Figura 4-12: Importación del modelo 3D de la bocina exponencial rectangular en el software de simulación ACTRAN VI¹⁶.



Fuente: propia

¹⁶ Imagen A: árbol de topologías con los dominios asignados en el modelo; en negrilla, el dominio designado en la abertura de la garganta, *Acoustic_Excitation*. Imagen B: representación gráfica de la bocina exponencial rectangular; en rojo, el dominio *Acoustic_Excitation*. Imagen C: asignación de nombre *Acoustic_Excitation* al dominio de dos dimensiones, con orden de interpolación lineal.

En concreto, *Acoustic_Excitation* es el dominio definido en la garganta, *Infinite_Elements* corresponde con el dominio asignado como interfaz de elementos finitos – infinitos, y *Air_Volume* es el dominio relacionado con el volumen de aire. Estos dominios se designaron de la misma forma en los demás modelos realizados. A cada dominio se definen unas propiedades específicas. No obstante, para realizar lo anterior, es necesario determinar el análisis que se quiere resolver. En la versión estudiantil de ACTRAN está disponible el análisis *Direct Frequency Response*, que consiste en simular un sistema vibro-acústico ante una excitación específica. Teniendo en cuenta el análisis elegido, se define el aire como fluido presente al interior y exterior de las bocinas. Las propiedades del fluido que solicita el software son la velocidad del sonido c y la densidad del aire ρ . Con el fin de hallar las propiedades solicitadas, se midió la temperatura T y se determinó la presión atmosférica P_o del lugar de la medición con la estación meteorológica *Davis Vantage VUE 6250*, a dos metros de altura. La velocidad c y la densidad ρ se calculan con las siguientes expresiones (Beranek, 1958):

$$c = 331.4 + (0.607 * T) \text{ [m/s]} \quad (4.15)$$

$$\rho = 1.29 + \frac{273}{T} \frac{P_o}{0.76} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (4.16)$$

Donde T se expresa en grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) y las unidades de la P_o son los metros por mercurio (mHg). La presión atmosférica P_o del lugar de la medición es 751 hPa o 0.563 mHg , la temperatura T es 19°C o 292.15°K , la velocidad c es igual a 343 m/s y la densidad ρ es 0.89 kg/m^3 .

Figura 4-13: Sensor integrado de la estación meteorológica *Davis Vantage VUE 6250*.



Fuente: propia

El fluido definido se asocia con el dominio *Air_Volume*. Luego, se define la condición de excitación en el dominio correspondiente con la abertura de la garganta, *Acoustic_Excitation*. El software ACTRAN VI permite configurar esta condición en términos de la velocidad, la cual se calculó

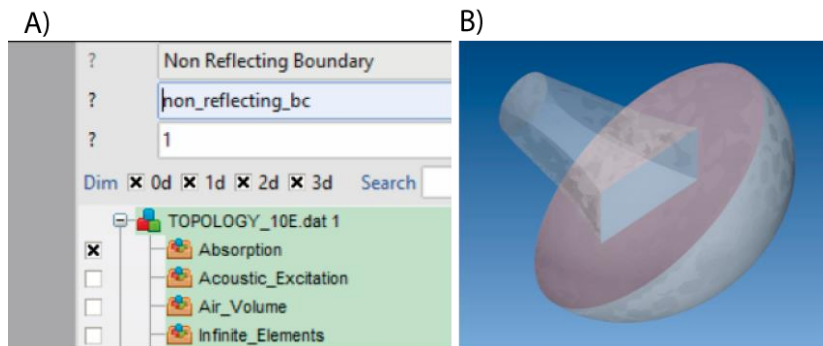
mediante la relación de la velocidad del diafragma v_d y la presión sonora p generada, por un altavoz mecánico, sobre el eje y a un metro de distancia (4.17) (Pueo & Romá, 2003).

$$v_d(f) = \frac{jpf}{\rho} \pi(r_d^2) [m/s] \quad (4.17)$$

La abreviatura r_d es el radio del diafragma del altavoz, igual a 0.025 m , y ρ es la densidad del aire. La presión sonora asumida para el cálculo de la velocidad, es la obtenida en la frecuencia f de 1000 Hz . Teniendo en cuenta que el nivel de presión sonora promedio es de 89.82 dB SPL , la presión sonora es igual a 0.619 Pa y la densidad del aire 0.89 kg/m^3 , la velocidad de diafragma v_d obtenida es de $j 0.3545 \text{ m/s}$. Al expresar el número complejo de la velocidad v_d en su forma polar (0.3545 m/s ; 90°), se demuestra que v_d está desfasado 90 grados respecto a la presión acústica.

Solo en los modelos de tres dimensiones se creó un dominio adicional, denominado *Absorption*, el cual está asignado en la superficie que bordea la abertura de la boca. Este dominio se asoció con la condición de superficie no reflejante (*no reflecting boundary condition*, en inglés), la cual es capaz de absorber la energía incidente en todas las frecuencias establecidas en la simulación. Se aplicó esta condición con el fin de evitar el efecto de la difracción, debido a que la distancia entre la superficie rígida, de los modelos en 3D de las bocinas, es menor que dos veces la longitud de onda de la frecuencia máxima simular, tal como se muestra en la Figura 4-10. En la siguiente Figura se indica, con color rojo, la superficie a la cual se asignó dicha condición.

Figura 4-14: Condición de superficie no reflejante asignada alrededor de la abertura de la boca, en los modelos de tres dimensiones.



Fuente: propia

Luego, se crea un micrófono virtual a 1 metro de distancia del axis de la boca, con el fin de simular la respuesta en frecuencia en dicha ubicación. Como se explica en el ANEXO C, por medio de la RF obtenida con dicho micrófono se realizó el estudio de convergencia de malla. Se crea un dominio denominado *Virtual_Microphone* y se relaciona con el micrófono creado.

Desde ACTRAN se crea el componente de los elementos infinitos IE con el propósito de simular la radiación acústica externa. El componente es dibujado como un elipsoide, con unas dimensiones definidas por el usuario. La condición para que se evidencie convergencia en los resultados de la simulación, es que la componente sea lo suficientemente grande para que las fuentes acústicas y la malla de los elementos finitos se encuentren en su interior. Su centro debe ser ubicado en la abertura donde el sistema sonoro emite energía libremente, en este caso, la boca de la bocina. Además de lo anterior, el usuario establece el orden de interpolación de la malla formada con los elementos infinitos. En el componente IE, la cantidad de nodos infinitos se determina mediante la multiplicación del número de nodos en la interfaz FE/IE y el orden de interpolación menos uno (Free Field Technologies SA, 2014). Para definir dicho orden de interpolación, fue necesario realizar un estudio de convergencia explicado en el ANEXO C. El componente de los elementos infinitos es asociado con la interfaz FE/IE.

Una vez generado el fluido infinito, se crean dos mallas estructuradas en 2D, las cuales sirven para observar el comportamiento de la presión sonora p y la velocidad de partícula v en el campo acústico externo. En la simulación de las bocinas en 3D, los dominios son dos planos intersectados. Se determina las dimensiones y la ubicación de estos; el largo y el ancho son de un metro. Cada una de las mallas es asociada con los dominios creados y denominados *DomainIE1* y *DomainIE2*.

Los dominios son asociados a unas herramientas de post – procesamiento, con el fin de visualizar los resultados del campo acústico interno y externo, así como la respuesta en frecuencia. La herramienta *Output Map*, se relaciona con el dominio *Air_Volume*. La segunda herramienta, *Field Map*, se asocia con los dominios de las mallas estructuradas *DomainIE1* y *DomainIE2*. La herramienta *Output FRF*, se relaciona con el dominio *Virtual_Microphone*.

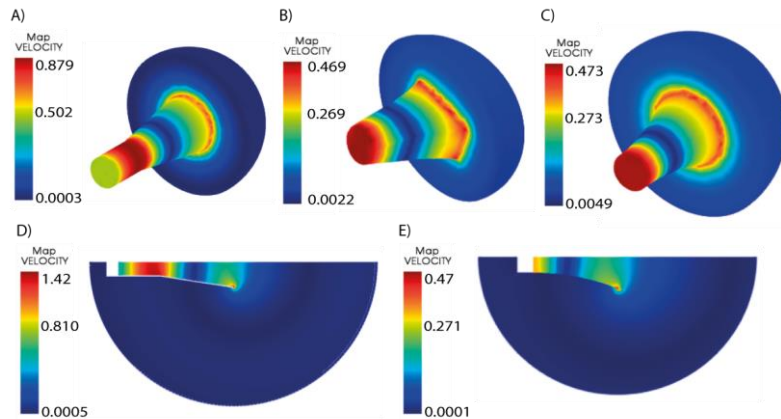
La versión estudiantil ACTRAN cuenta con una herramienta, llamada *MUMPS*, capaz de realizar la solución de la matriz con las ecuaciones diferenciales que modelan el problema acústico a simular. En general, este solucionador se caracteriza por ser más rápido y requerir menos memoria RAM que

SPARSE, la otra herramienta disponible en esta versión del software. Con todos los pasos realizados, se exporta el análisis *Direct Frequency Response* obtenido como un archivo con el formato .EDAT. La herramienta *MUMPS* soluciona la matriz para cada frecuencia establecida en la configuración, y una vez culmina con todo el rango, se procede a efectuar el post – procesamiento de la simulación.

4.4.4 Post – procesamiento de la simulación numérica

Este paso comienza al abrir, en ACTRAN, el archivo generado con el formato .EDAT. Se importan los resultados obtenidos con el solucionador MUMPS, específicamente con las herramientas que permiten observar el campo acústico al interior y al exterior de la bocina, *Output map* y *Field map*, las cuales fueron asociadas con los dominios del problema en la etapa de pre – procesamiento. En el estudio de convergencia de malla, detallado en el ANEXO C, el campo acústico es representado con los niveles de presión sonora. En el desarrollo ingenieril, el campo acústico es mostrado en términos de la velocidad de partícula v .

Figura 4-15: Simulación del campo acústico al interior de las bocinas, en términos de la velocidad de partícula y en la frecuencia de 1 kHz.



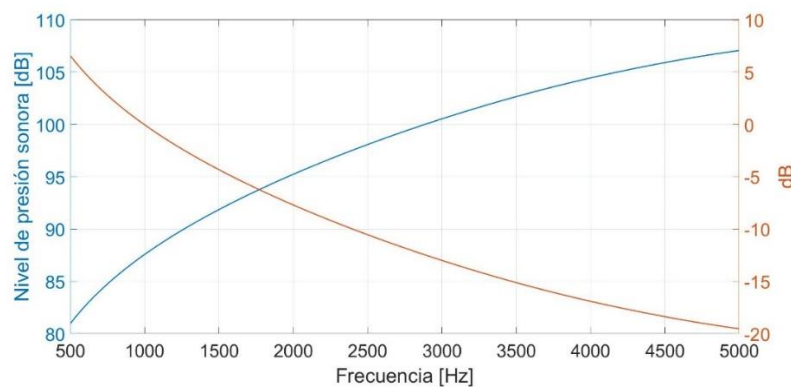
Fuente: propia

Se debe considerar que la presión sonora p producida en el dominio *Acoustic_Excitation*, que simula el comportamiento vibro-acústico del *driver* de compresión, no es constante con la frecuencia f . La velocidad del diafragma, como se expresa en la ecuación (4.17), tiene una relación directamente proporcional con la f , y al solo ser calculada en 1000 Hz e ingresada en la condición de excitación,

la velocidad resulta siendo mayor y menor, en frecuencias inferior es y superiores de 1000 Hz, respectivamente.

Se realizó un ajuste en las respuestas en frecuencia simuladas con el fin de eliminar el efecto de la variación del nivel de presión sonora, producida por la velocidad del diafragma constante. Este ajuste se calculó de la misma manera que en la RF del *driver* de compresión. En este caso, los niveles de presión sonora se ajustaron para que fueran iguales a 87.54 dB, nivel obtenido en la frecuencia de 1000 Hz. En la Figura 4-16 se muestra en azul la respuesta en frecuencia propia de la condición de excitación establecida, y en rojo el ajuste aplicado a las RF de las bocinas simuladas.

Figura 4-16: Respuesta en frecuencia obtenida con la condición de excitación establecida en el ACTRAN VI.



Fuente: propia

Con el estudio de convergencia de malla, se determina que los resultados de la simulación convergen con la malla formada por 10 elementos lineales por λ . Posteriormente, se procede a construir y medir la RF de las bocinas.

4.5 Impresión en 3D de las bocinas

Las bocinas se construyeron con la impresora 3D *Creator Pro*, de la marca *Flashforge*, dispositivo disponible en el programa de ingeniería de sonido. La Fabricación por Filamento Fundido, *Fused Filament Fabrication FFF* en inglés, es el proceso que dicha impresora realiza para construir los objetos. Esto implica que el dispositivo hace uso de un filamento continuo de materiales termoplásticos, los cuales se deslizan al interior de un extrusor, con una temperatura elevada, el cual

se encarga de derretir los respectivos materiales sobre una superficie denominada placa de construcción. Los movimientos del cabezal del extrusor son controlados a través de una codificación ingresada al dispositivo, permitiendo generar la forma del objeto modelado. La impresora emplea una técnica aditiva de fabricación, donde el extrusor produce varias capas del material fundido, formando el sólido del objeto deseado.

Los materiales termoplásticos utilizados en el proceso de extrusión fueron el acrilonitrilo butadieno estireno ABS y el ácido poliláctico PLA. En comparación con el PLA, el ABS se caracteriza por generar piezas más resistentes, menos flexibles. La extrusión del ABS se realiza a temperaturas más elevadas, entre los 230 y 245 grados centígrados, esto según el diámetro del filamento. Al imprimir con ABS, la placa de construcción debe tener una temperatura de 110 grados centígrados aproximadamente, siendo mayor a la establecida con la extrusión del PLA. Por otro lado, la impresión del PLA se efectúa a menores temperaturas, entre 205 a 215 grados centígrados. A diferencia del ABS, el PLA se caracteriza por no generar gases nocivos al momento de ser extruido y por ser más rígido. La ventaja del PLA respecto al ABS, radica en que se pueden imprimir piezas y objetos con menor deformación y agrietamiento.

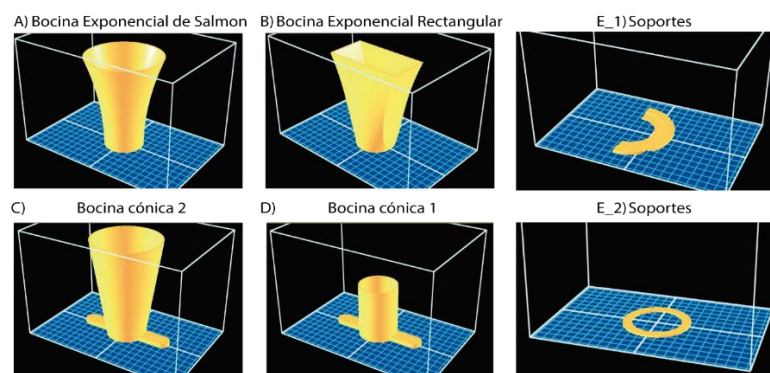
El software libre manipulado para configurar la impresora *Creator Pro* fue *ReplicatorG*; la configuración realizada en este software se muestra en el ANEXO K. Las bocinas son modeladas en *AutoCAD*, exportadas como archivos con el formato de archivo .STL, y luego, importadas al programa mencionado. Al momento de observar el modelo del objeto en la ventana principal, en la pestaña *GCode* se ingresan ciertos parámetros que definen la impresión; el uso del soporte *raft*, útil para formar el objeto; la cantidad de relleno de material *Object Infill*; la altura de las capas *Layer Height*; la velocidad de impresión *FeedRate*; la temperatura del extrusor *Print Temperature* y el extrusor utilizado, debido a que la impresora *Creator Pro* está compuesta por dos.

A través del dibujo y la configuración establecida en cada bocina, *ReplicatorG* genera un código con las sintaxis del lenguaje *Python*, donde se indican los movimientos que debe ejercer la cabecera del extrusor para generar la forma de los objetos a imprimir. En dicho código se define, para cada tipo de material, la temperatura de la placa constructora, siendo equivalente a 70 grados centígrados.

Las dimensiones máximas de impresión de la *Creator Pro* son iguales a 22.7 centímetros de largo, 14.8 centímetros de ancho y 15 centímetros de alto. Considerando las frecuencias mínimas de

reproducción, las dimensiones limitadas de la impresora fueron un factor que influyó en la reducción del tamaño de las bocinas. Como se ilustra en las imágenes C y D de la Figura 4-17, fue necesario dividir la bocina cónica en dos secciones. Para imprimir las bocinas se recurrió a utilizar el material PLA, debido a la precisión requerida en sus paredes rígidas. Con el propósito de acoplar las bocinas con el driver de compresión, se diseñaron e imprimieron unos soportes que permiten establecer la unión entre dichos objetos. Por la rigidez y dureza solicitada, estos soportes se imprimieron con el material termoplástico ABS.

Figura 4-17: Bocinas y soportes modelados en el software de impresión *Replicator G*.



Fuente: propia

4.6 Medición de la respuesta en frecuencia de las bocinas sin material absorbente.

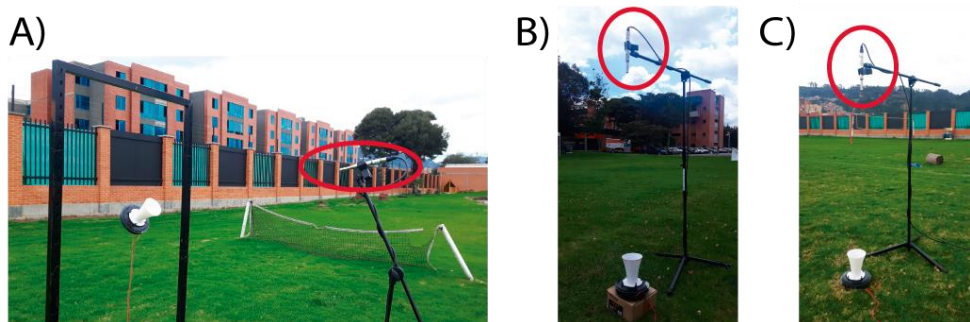
La medición de la RF de las bocinas se realizó en la cancha de fútbol de la Universidad. Se empleó la misma conexión y los mismos equipos utilizados para la medición de la RF del *driver* de compresión, mostrados en la Figura 4-1. Debido a que el método de medición planteado en la investigación es experimental, y con la falta de una cámara anecoica que garantice un campo sonoro libre, se efectuaron tres configuraciones diferentes. A través del análisis de componentes principales ACP, explicado y detallado en el **ANEXO D**, se comparan los resultados obtenidos en estas configuraciones con las respuestas en frecuencia simuladas en ACTRAN VI y, así, se determina la configuración de medición más idónea. Las características de las configuraciones, mostradas en la Figura 4-18, son las siguientes:

- El *driver*, junto con la bocina, se cuelga sobre una base de metal, tal como se muestra en la Figura A. La altura de la abertura de la boca es de 1 metro. En esta configuración, la energía

sonora se propaga paralelamente al suelo, por lo cual, las mediciones pueden afectarse por el filtro peine causado por las reflexiones que se producen sobre el pasto.

- Como se ilustra en la Figura B, el *driver* de compresión acoplado con las bocinas se ubica sobre una caja de cartón. Esta caja tiene una altura de 15 centímetros. Al no estar en contacto directamente, se evita que el factor de directividad Q del *driver* aumente.
- Como se puede observar en la Figura C, el *driver* de compresión, con la bocina acoplada, se ubicó sobre el suelo. Con esta configuración, se considera que el pasto es absorbente para las frecuencias establecidas, es decir, desde 500 Hz a 5 kHz.

Figura 4-18: Configuraciones de medición de la respuesta en frecuencia, propuestas durante el desarrollo ingenieril¹⁷.



Fuente: propia

Los resultados del análisis de los componentes principales, para cada tipo de bocina, fueron los siguientes:

- En la bocina exponencial de Salmon se encontró mayor correlación ($r = 0.829$) entre la RF medida con la configuración realizada con el *driver* de compresión sobre el suelo y la RF simulada con el modelo en tres dimensiones. La varianza entre estas respuestas en frecuencia son las más similares: la correlación que tienen estas dos muestras con el primer componente principal PC es igual a 0.961, para la RF medida, y 0.93, para la RF simulada; la correlación

¹⁷ El micrófono BEHRINGER ECM8000 se señala con un círculo rojo.

entre dichas muestras y el segundo *PC* es de -0.167, para la RF medida, y 0.309, para la RF simulada.

- Al igual que en la bocina mencionada anteriormente, en la bocina exponencial rectangular se registró mayor correlación ($r = 0.896$) entre la RF medida con la configuración realizada con el *driver* en el suelo y la RF simulada con el modelo 3D. La correlación que tienen estas dos muestras con el primer *PC* es igual a 0.941, para la RF medida, y 0.895, para la RF simulada; la correlación entre dichas muestras y el segundo *PC* es de 0.2, para la RF medida, y 0.326, para la RF simulada. Con una diferencia de 0.046 y de 0.126, entre las correlaciones con el primer y segundo componente principal, se verifica que estas muestras tienen las varianzas más similares.
- En la bocina cónica, la correlación de Pearson más alta encontrada ($r = 0.510$), entre la respuesta en frecuencia medida y simulada, es la RF obtenida con el *driver* de compresión sobre la caja y la RF del modelo en 3D. A diferencia de las bocinas descritas anteriormente, en este caso, la segunda correlación más alta se registró con la RF medida con el *driver* sobre el suelo ($r = 0.328$). Ya que la primera correlación mencionada no es significativa, y con los resultados obtenidos con las bocinas anteriores, se decide considerar la medición de la RF, de la bocina cónica, hecha con el *driver* de compresión sobre el suelo. La correlación que tiene esta RF medida y la simulada en 3D, con el primer componente principal *PC*, es igual a 0.75 y a 0.811, respectivamente. La correlación entre dichas muestras y el segundo *PC* es de -0.56 y 0.54.

Las respuestas en frecuencia, medidas y simuladas por cada bocina, son ilustradas en las Figura 5-1, Figura 5-2 y la Figura 5-3 del “Capítulo V. Pruebas y resultados”. Luego, se establece la ubicación de los cuatro materiales absorbentes al interior de las bocinas y se miden las RF respectivas.

4.7 Implementación del material absorbente al interior de las bocinas.

La ubicación de los materiales porosos se estableció según el comportamiento de la velocidad de partícula v al interior de las bocinas, en las frecuencias donde se producen picos y valles en la RF medida con el *driver* de compresión sobre el suelo. Por medio del post – procesamiento de las simulaciones realizadas con el método de los elementos finitos FEM, se observan los puntos donde se producen máximos de v .

En la Figura 5-4, se muestra la representación del campo acústico de las tres bocinas desarrolladas, en función de la velocidad de partícula v . La primera, segunda y tercera fila de Figuras corresponde con la bocina cónica, la bocina exponencial rectangular y la bocina exponencial de Salmon, respectivamente. Las frecuencias, en las cuales se muestra del campo acústico, fueron seleccionadas según los picos y/o los valles más significativos por banda de octava, de las respuestas RF mostradas en las Figuras del siguiente capítulo.

Con la simulación, se observó que la concentración de la energía sonora varía en función de la frecuencia f . A medida que aumenta la frecuencia, la cantidad de lugares donde se producen los máximos de v , al interior de las tres bocinas, también aumentan. En la Figura A y G, la velocidad de partícula es considerable en la mitad. En la Figura D, la velocidad v es significativa en la abertura de la boca. En las demás Figuras, se observa que los máximos de v se producen en la garganta, en la mitad y, en algunos casos, en la boca. Por esta razón, se establece que los cuatro materiales absorbentes deben ubicarse en los tres puntos mencionados con antelación.

4.8 Medición de la respuesta en frecuencia de las bocinas con los materiales absorbentes.

Una vez establecida las ubicaciones de los materiales absorbentes, se procede a medir la respuesta en frecuencia de las tres bocinas. De igual manera, estas mediciones se efectuaron en la cancha de fútbol, siendo el lugar más anecóico de las instalaciones de la universidad. Acorde a los resultados del análisis de componentes principales ACP, estas mediciones se realizaron con el *driver* de compresión sobre el suelo, puesto que es la configuración que produce una RF más semejante a la simulada en ACTRAN. Los equipos utilizados para realizar estas mediciones, son los mostrados en la Figura 4-1 del documento.

Las respuestas en frecuencia medidas con los materiales porosos implementados se ilustran, por cada bocina y por cada ubicación del absorbente, en el “Capítulo V. Pruebas y resultados”.

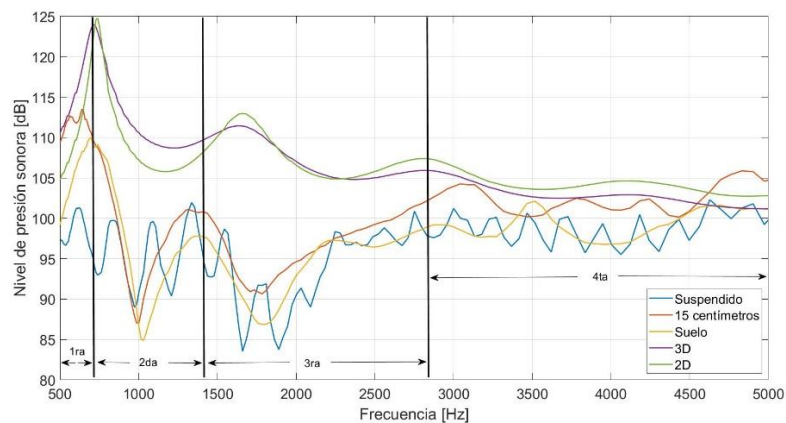
5. Capítulo V. Pruebas y resultados

5.1 Pruebas

En este apartado, se muestran las respuestas en frecuencia medidas con y sin material absorbente. Así mismo, se ilustran los resultados de la simulación realizada con el método de los elementos finitos FEM; tanto la respuesta en frecuencia a un metro de la abertura de la garganta, como el campo acústico en términos de la velocidad de partícula v . Los pasos empleados para obtener estos resultados, se detallaron en el capítulo anterior.

5.2 Resultados

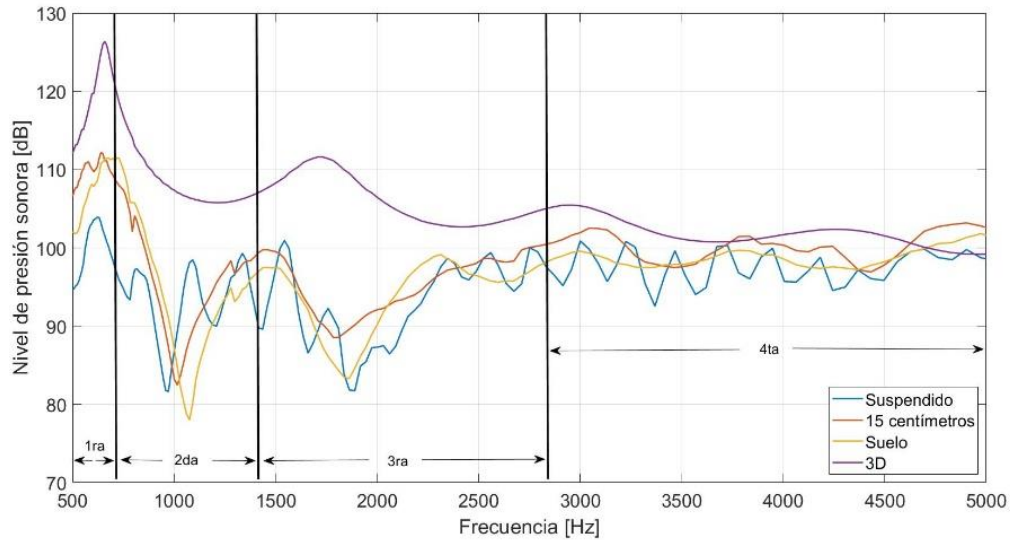
Figura 5-1: Respuesta en frecuencia, medida y simulada, con la bocina exponencial de Salmon sin material absorbente¹⁸.



Fuente: propia

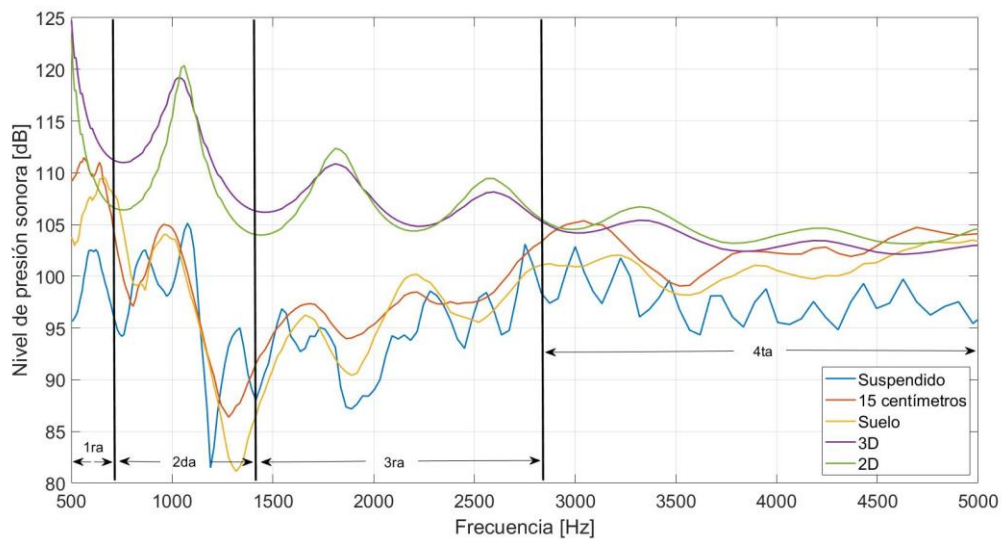
¹⁸ Según la leyenda, mostrada en la esquina inferior derecha, las tres primeras RF corresponden a las obtenidas con las configuraciones establecidas, mientras que las dos últimas RF son las simuladas en ACTRAN VI.

Figura 5-2: Respuesta en frecuencia, medida y simulada, con la bocina exponencial rectangular sin material absorbente.



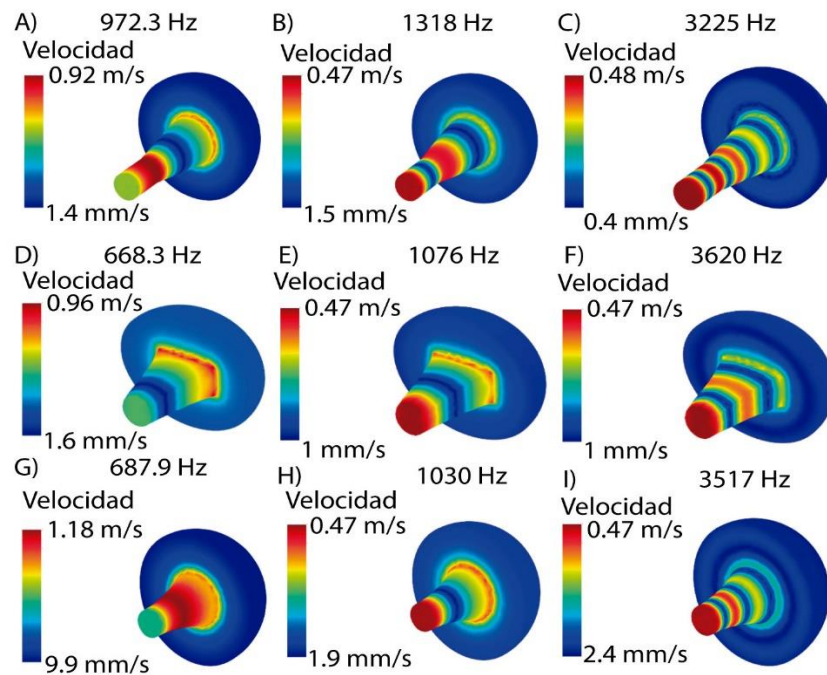
Fuente: propia

Figura 5-3: Respuesta en frecuencia, medida y simulada, con la bocina cónica sin material absorbente.



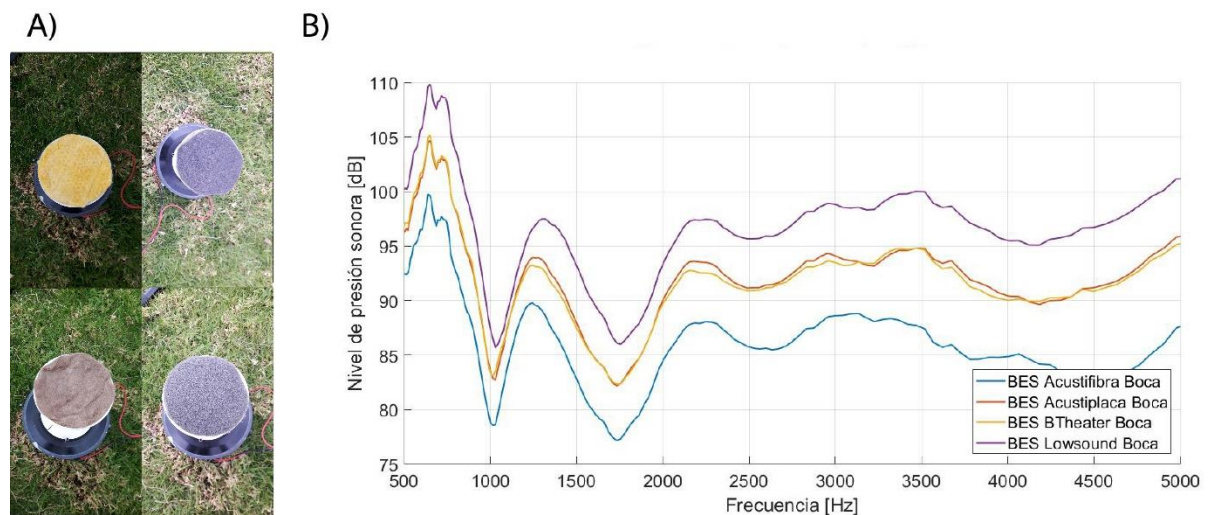
Fuente: propia

Figura 5-4: Simulación del campo acústico al interior de las bocinas, a través del método de los elementos finitos FEM, en términos de la velocidad de partícula v .



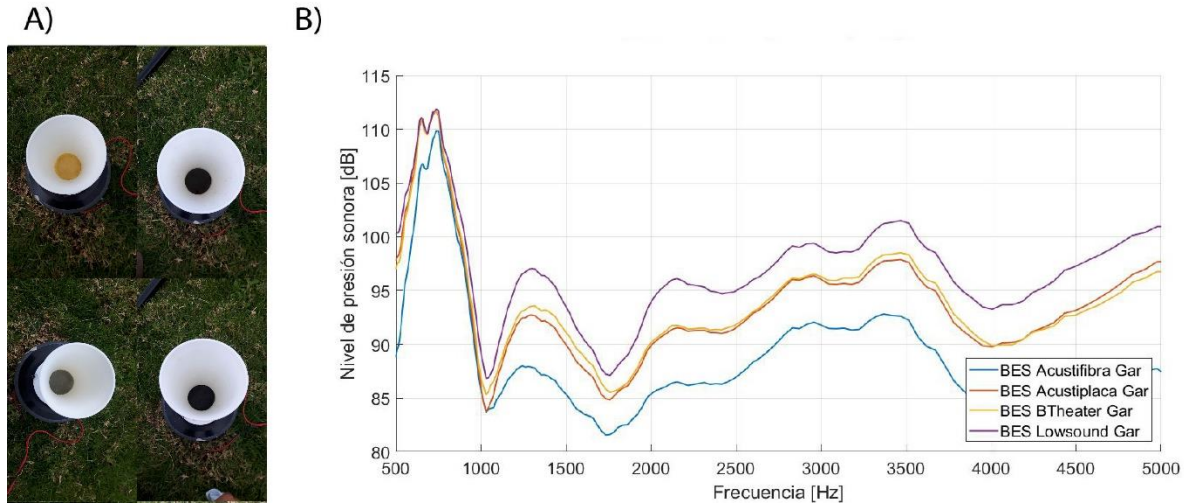
Fuente: propia

Figura 5-5: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial de Salmon, con los cuatro materiales ubicados en la boca.



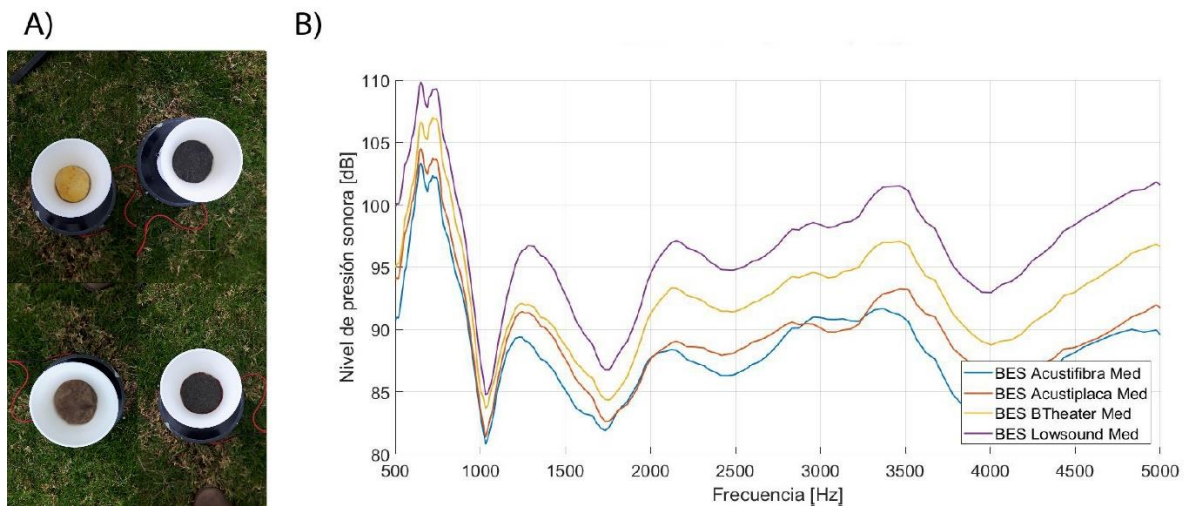
Fuente: propia

Figura 5-6: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial de Salmon, con los cuatro materiales ubicados en la garganta.



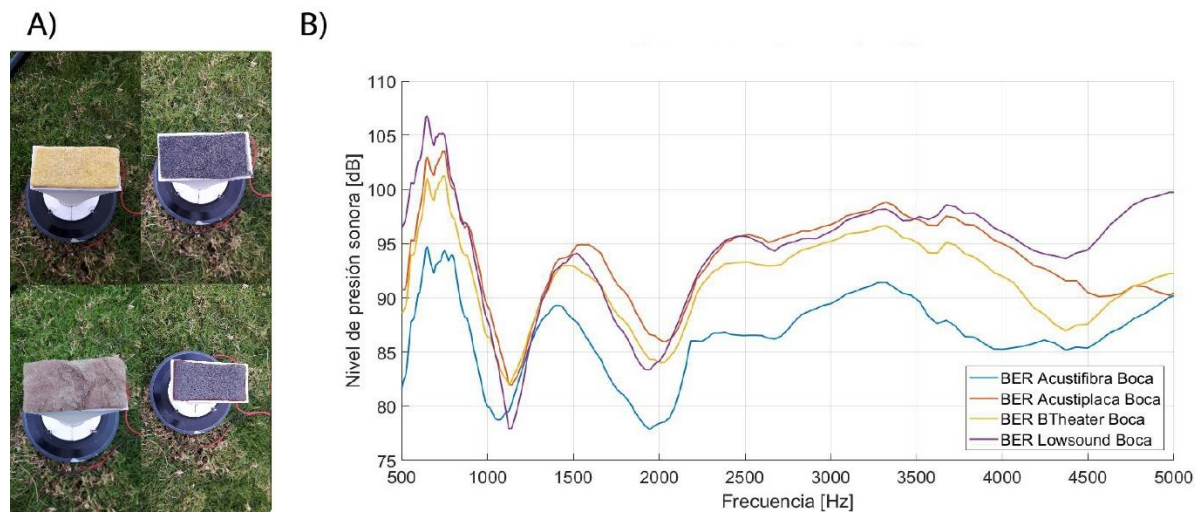
Fuente: propia

Figura 5-7: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial de Salmon, con los cuatro materiales ubicados en la mitad.



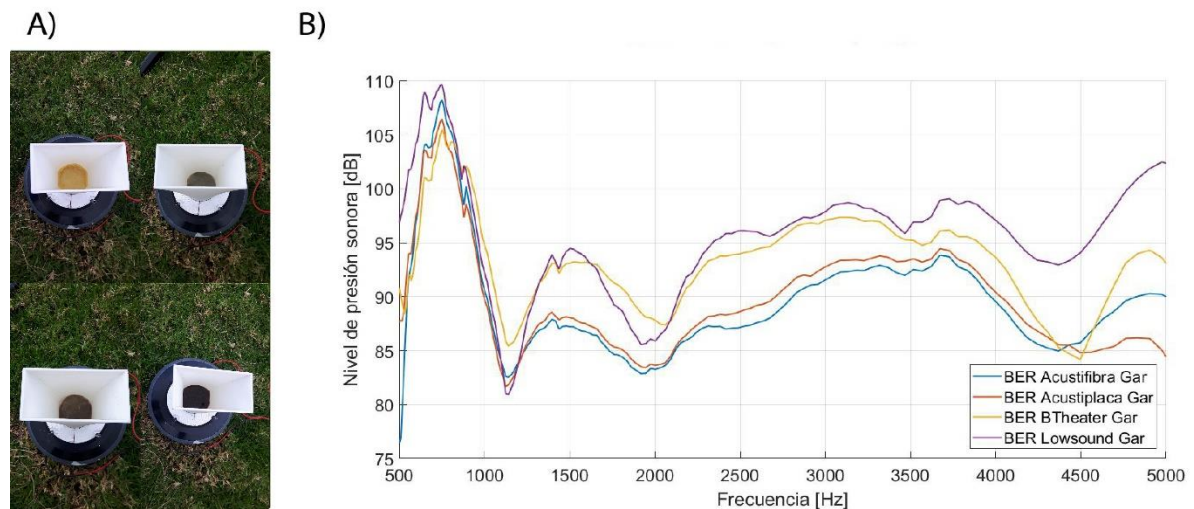
Fuente: propia

Figura 5-8: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial rectangular, con los cuatro materiales ubicados en la boca.



Fuente: propia

Figura 5-9: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial rectangular, con los cuatro materiales ubicados en la garganta.



Fuente: propia

Figura 5-10: Respuesta en frecuencia de la bocina exponencial rectangular, con los cuatro materiales ubicados en la mitad.

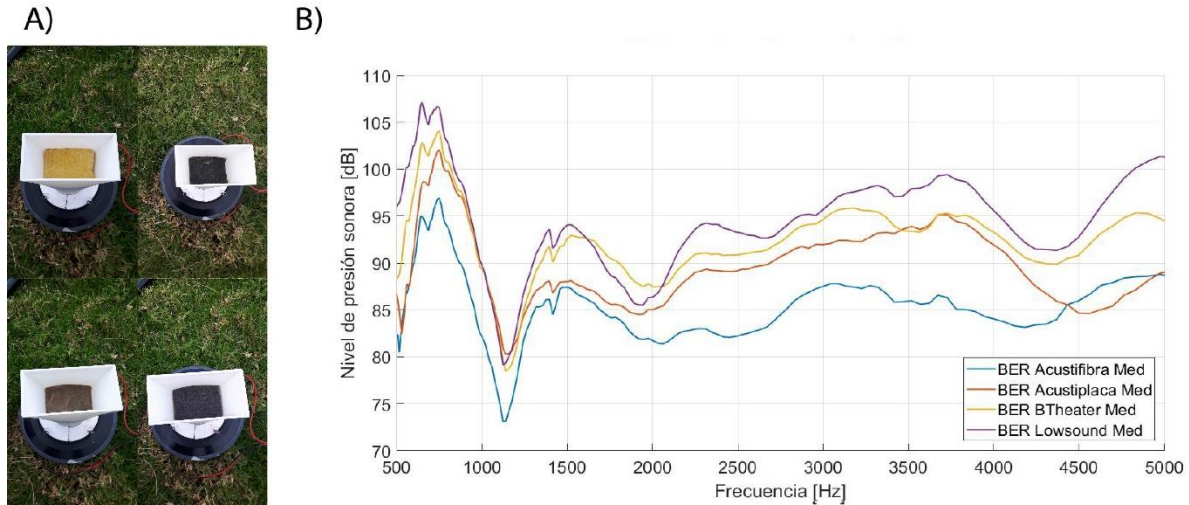


Figura 5-11: Respuesta en frecuencia de la bocina cónica, con los cuatro materiales ubicados en la boca.

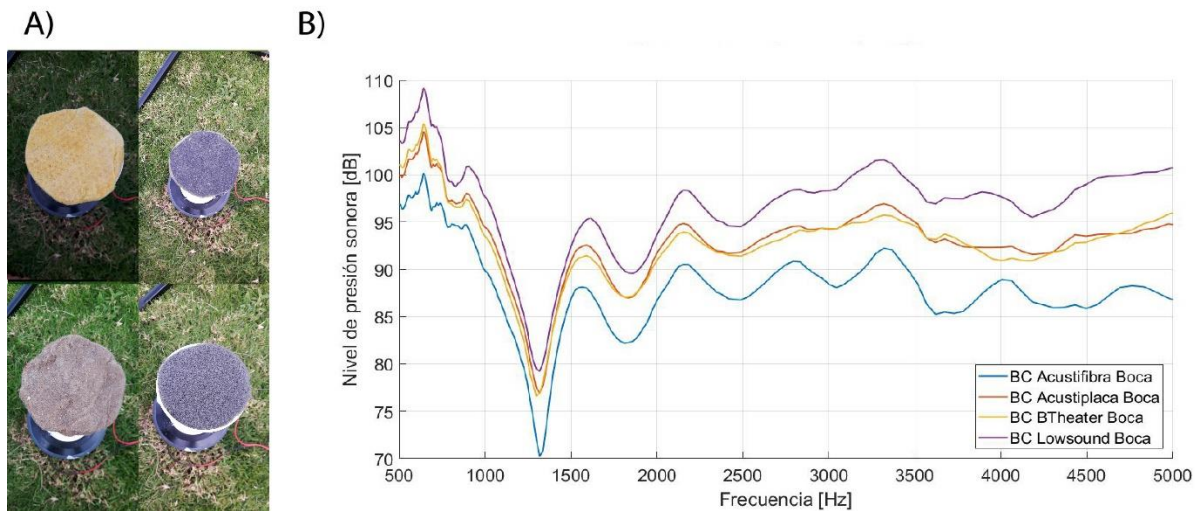
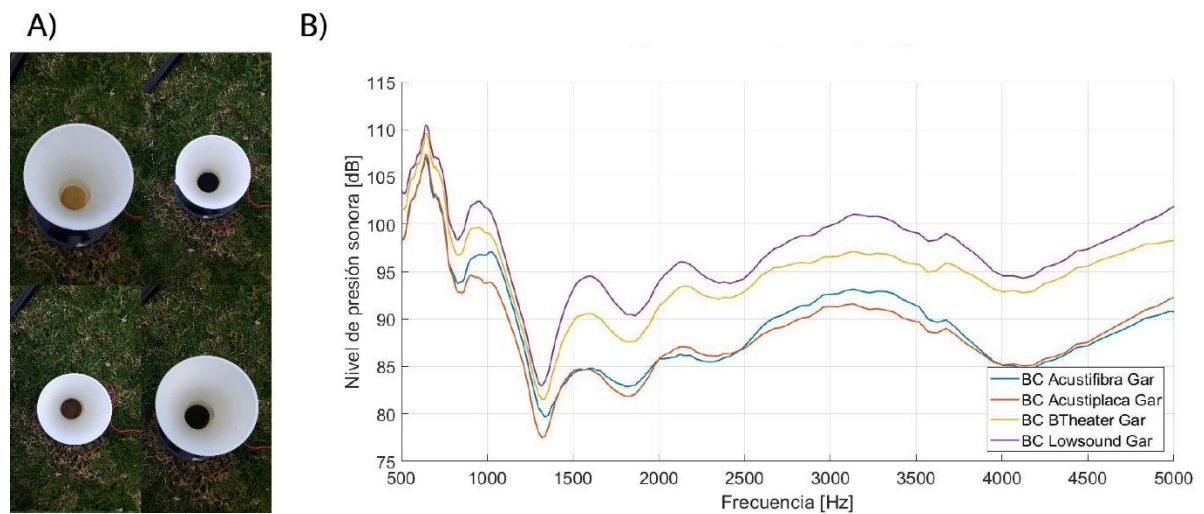
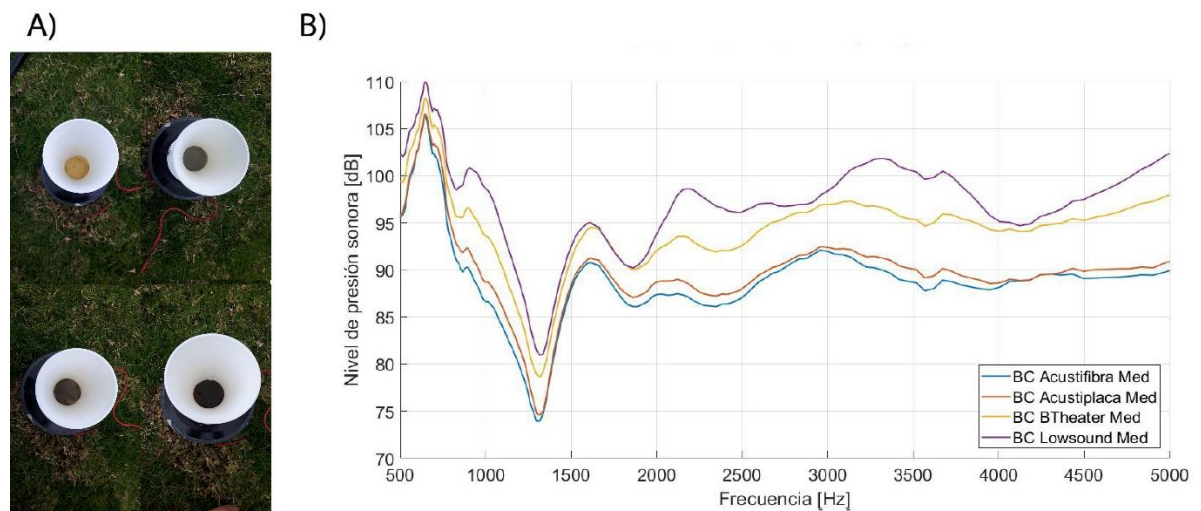


Figura 5-12: Respuesta en frecuencia de la bocina cónica, con los cuatro materiales ubicados en la garganta.



Fuente: propia

Figura 5-13: Respuesta en frecuencia de la bocina cónica, con los cuatro materiales ubicados en la mitad.



Fuente: propia

6. Capítulo VI. Discusión.

6.1 Caracterización de las respuestas en frecuencia medidas, con y sin material absorbente.

A través de la estadística descriptiva, se determinó las características de las RF obtenidas. Para esto, fue necesario convertir los valores logarítmicos de los niveles de presión sonora SPL a valores lineales de presión acústica p . Al comienzo, se detalla la caracterización de la bocina exponencial de Salmon, y luego, de la bocina exponencial rectangular y de la bocina cónica. Las medidas estadísticas que describen el comportamiento de las respuestas en frecuencia son:

- El diagrama de cajas y bigotes.
- La desviación estándar DE .
- El coeficiente de asimetría de Pearson γ .
- El rango R .

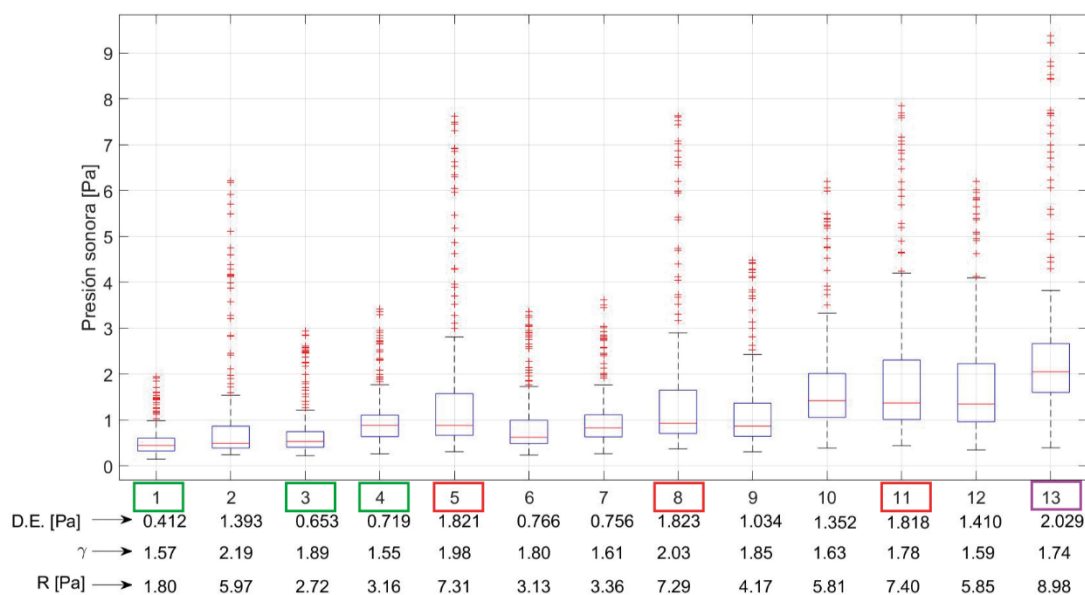
La interpretación de estas medidas se explica en el ANEXO E del documento. La caracterización se realiza en el rango de frecuencias f desde 500 Hz hasta 5 kHz. Sin embargo, con lo observado en las RF medidas, se considera que el efecto producido por el material absorbente no es semejante en todo el rango de f propuesto. Por esta razón, la caracterización también se realiza en las bandas de octava con las frecuencias centrales f_c de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz.

En cada Figura se muestran las medidas estadísticas descriptivas, aplicadas para cada respuesta en frecuencia, con y sin material absorbente. El eje horizontal está compuesto por doce variables, que representan las siguientes mediciones: **1, 2 y 3 con la “acustifibra”; 4, 5 y 6 con la “acustiplaca”; 7, 8 y 9 con el *Black Theater*; 10, 11 y 12 con el *Lowsound*. La primera, segunda y tercera medición de cada material mencionado indica su ubicación en la boca, la garganta y la mitad.** La medición número 13 representa la RF obtenida sin material absorbente.

6.1.1 Bocina exponencial de Salmon.

En la Figura 6-1 se ilustra el diagrama de cajas, la desviación estándar DE y el coeficiente de asimetría γ para cada una de las mediciones realizadas con la bocina exponencial de Salmon, en el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz. Los cuadros verdes indican las tres mejores respuestas en frecuencia obtenidas, según su distribución simétrica y su baja DE . Con los cuadros rojos, se señalan las tres RF con la mayor dispersión y la distribución más asimétrica de la presión sonora. Estas medidas descriptivas, calculadas para las bandas de octava descritas con antelación, se muestran en el **ANEXO E** del documento.

Figura 6-1: Diagrama de cajas de las RF obtenidas con la bocina exponencial de Salmon, calculado desde 500 Hz hasta 5 kHz.



Fuente: propia

Con los resultados mostrados anteriormente, se evidencia que con la “acustiplaca”, el *Black Theater* y el *Lowsound* se producen las dispersiones y distribuciones con mayor significancia. Lo anterior, depende su ubicación al interior de la bocina. Si estos materiales se ubican en la garganta, se obtienen las RF menos favorables. De lo contrario, si estos materiales son implementados en la boca, la dispersión de la presión sonora p , respecto a la media aritmética, tiende a ser menor.

A través de lo mostrado en la Figura 6-1 y en las Figuras del ANEXO E, se deduce lo siguiente:

- La respuesta en frecuencia medida sin material absorbente tiene una desviación DE equivalente a $2.029 Pa$. Su distribución es asimétrica, con un coeficiente γ igual a 1.74. El rango R es de $8.98 Pa$ donde los valores máximos y mínimos de presión sonora se evidencian en las frecuencias de $750.51 Hz$ ($p = 9.37 Pa$) y $1060.9 Hz$ ($p = 0.39 Pa$). La banda de octava con la mayor dispersión y la distribución más asimétrica es la de $f_c = 1000 Hz$ ($DE = 2.725 Pa, R = 8.98 Pa, \gamma = 1.15$). Por otra parte, la banda de octava con $f_c = 4000 Hz$ se caracteriza por tener los resultados más favorables ($DE = 0.381 Pa, R = 1.48 Pa, \gamma = 0.2$).
- La RF con la dispersión menos significativa se obtuvo con la lana de roca “acustifibra” ubicada en la boca ($DE = 0.412 Pa$). Esta RF tiene la distribución más simétrica de la presión sonora; el coeficiente de simetría γ es equivalente a 1.55. Su rango es el más bajo entre las doce RF medidas con material poroso ($R = 1.8 Pa$). La banda de octava con $f_c = 1000 Hz$ presenta las medidas más desfavorables ($DE = 0.354 Pa, R = 2.56 Pa, \gamma = 1.44$), mientras con la banda de $f_c = 4000 Hz$ se obtienen la más favorables ($DE = 0.093 Pa, R = 0.66 Pa, \gamma = 0.03$). Por el contrario, al cambiar su ubicación a la garganta los resultados se ven más perjudicados, obteniendo una desviación $DE = 1.393 Pa$, una asimetría $\gamma = 2.19$ y un rango $R = 5.97 Pa$. Las bandas de octava con las medidas más y menos desfavorables es la de $f_c = 1000 Hz$ ($DE = 1.82 Pa, R = 7.31 Pa, \gamma = 1.63$) y la de $f_c = 2000 Hz$ ($DE = 0.119 Pa, R = 0.513 Pa, \gamma = 1.14$).
- En menor medida que el material descrito con antelación, se registró una baja desviación con la lana de roca “acustiplaca” ubicada en la boca ($DE = 0.719 Pa$). A su vez, su distribución es una de las más simétricas ($\gamma = 1.89$) y su rango es uno de los más reducidos ($R = 3.16 Pa$). La banda de octava con $f_c = 1000 Hz$ muestra las medidas menos favorables ($DE = 0.681 Pa, R = 2.56 Pa, \gamma = 1.44$). Por otro lado, en la banda de $f_c = 4000 Hz$ se obtienen las medidas con los resultados que indican menor fluctuación ($DE = 0.174 Pa, R = 0.66 Pa, \gamma = 0.03$).
- El *Black Theater* sobre la garganta produce la RF con las medidas estadísticas más desfavorables ($DE = 1.823 Pa, R = 7.29 Pa, \gamma = 2.03$); las bandas de octava con frecuencias centrales de

1000 Hz ($DE = 2.172 Pa, R = 7.25 Pa, \gamma = 1.59$) y de 2000 Hz ($DE = 0.21 Pa, R = 0.90 Pa, \gamma = 0.66$) presentan la mayor y menor irregularidad, respectivamente.

6.1.2 Bocina exponencial rectangular

El diagrama de cajas y bigotes, la desviación estándar DE , el coeficiente de asimetría γ y el rango R son mostrados en la Figuras del ANEXO E. Con los resultados de estas medidas, calculadas en el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz, y por bandas de octava, se realizan las siguientes deducciones:

- La RF obtenida sin material absorbente tiene una desviación DE igual a 2.135 Pa. El coeficiente de asimetría γ es de 0.34. El rango R equivale a 9.62 Pa, obteniendo el valor máximo y el mínimo en las frecuencias de 649.3 Hz ($p = 9.78 Pa$) y 1076.34 Hz ($p = 0.16 Pa$). La banda de octava con las medidas más desfavorables, es la de $f_c = 1000 Hz$ ($DE = 2.33 Pa, R = 8.19 Pa, \gamma = 1.53$). Por otra parte, la banda de octava con $f_c = 4000 Hz$ presenta la menor dispersión ($DE = 0.368 Pa, R = 1.43 Pa, \gamma = 0.54$) y la de $f_c = 2000 Hz$ tiene la distribución más simétrica ($DE = 0.528 Pa, R = 1.72 Pa, \gamma = -0.35$).
- La respuesta en frecuencia con la dispersión más favorable es la obtenida con la fibra de vidrio “acustifibra”, ubicada en la boca de la bocina. Su desviación estándar DE es igual a 0.229 Pa. Además, con esta respuesta en frecuencia medida se evidencia la distribución más simétrica de la presión sonora; el coeficiente de asimetría γ es equivalente a 0.78, siendo el más cercano a 0. El rango ($R = 0.93 Pa$) de esta respuesta en frecuencia es el más bajo registrado en las doce RF medidas con material absorbente. La mayor dispersión, asimetría y rango ($DE = 0.277 Pa, R = 0.87 Pa, \gamma = 0.71$) se registra en la banda de octava con $f_c = 1000 Hz$, mientras que en la banda con $f_c = 2000 Hz$ estos resultados son los más favorables ($DE = 0.118 Pa, R = 0.38 Pa, \gamma = -0.31$). Estos resultados se perjudican al cambiar la ubicación de la “acustifibra” a la garganta, obteniendo una desviación $DE = 1.123 Pa$, una asimetría $\gamma = 2.08$ y un rango $R = 5.02 Pa$, siendo uno de los más desfavorables. En las bandas de octava con $f_c = 1000 Hz$ ($DE = 1.549 Pa, R = 4.89 Pa, \gamma = 1.11$) y con $f_c = 2000 Hz$ ($DE = 0.086 Pa, R = 0.38 Pa, \gamma = 0.40$), se obtiene la dispersión y la asimetría, más y menos significativa.

- Aunque en menor medida que la RF descrita anteriormente, las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio “acustifibra” en la mitad y la fibra de vidrio *Black Theater* en la boca, obtuvieron los resultados más favorables de la dispersión y distribución de presión sonora. La desviación estándar DE es igual a $0.27 Pa$ y $0.48 Pa$, el coeficiente de asimetría γ es equivalente a 1.66 y 1.12 y el rango es de $1.30 Pa$ y $2.05 Pa$, respectivamente.
- Al ubicar en la garganta y en la mitad, la espuma de poliuretano *Lowsound*, se obtienen las respuestas en frecuencia con la dispersión, el rango y la distribución de la presión sonora menos favorable. Con la primer RF mencionada, se obtuvo una $DE = 1.427 Pa$, un $R = 5.81 Pa$ y una $\gamma = 1.55$. Por otro lado, la segunda RF indicada presentó una desviación $DE = 1.037 Pa$, un rango $R = 4.37 Pa$ y una asimetría $\gamma = 1.40$. La banda de octava con $f_c = 1000 Hz$ fue en la que se registró la desviación estándar más alta y el mayor rango; en la garganta, $DE = 1.80 Pa$ y $R = 5.81 Pa$; en la mitad, $DE = 1.22 Pa$ y $R = 4.14 Pa$.

6.1.3 Bocina cónica

Al igual que las medidas estadísticas descriptivas de la bocina exponencial rectangular, el diagrama de cajas y bigotes, la desviación estándar DE , el coeficiente de asimetría γ y el rango R , obtenidos con las RF de la bocina cónica, son mostrados en el ANEXO E del documento. Con los resultados de las medidas descriptivas, se observa lo siguiente:

- La respuesta en frecuencia medida sin material absorbente tiene una desviación DE igual a $1.566 Pa$. El coeficiente de asimetría γ es equivalente a 1.18 . El rango R es de $7.89 Pa$, obteniendo en las frecuencias de $649.3 Hz$ y $1336.67 Hz$ el valor máximo ($p = 8.15 Pa$) y mínimo ($p = 0.26 Pa$) de presión sonora, respectivamente. La banda de octava con la mayor desviación y rango es la de $f_c = 1000 Hz$ ($DE = 1.44 Pa, R = 5.18 Pa$). La banda de octava con $f_c = 4000 Hz$ tiene los resultados más favorables ($DE = 0.37 Pa, R = 1.46 Pa, \gamma = 0.19$).
- La RF con la menor dispersión se obtuvo con la lana de roca “acustifibra” sobre la boca. La desviación estándar DE es igual a $0.45 Pa$. La mayor y la menor dispersión se evidencia en la banda de octava con $f_c = 1000 Hz$ ($DE = 0.431 Pa$) y con $f_c = 4000 Hz$ ($DE = 0.11 Pa$), respectivamente. Su coeficiente de asimetría ($\gamma = 1.02$) es el más bajo entre las doce RF

medidas. Así mismo, el rango es el más bajo entre los registrados ($R = 1.96 Pa$). La banda con $f_c = 1000 Hz$ ($R = 1.35 Pa$) y con $f_c = 4000 Hz$ ($R = 0.45 Pa$) tienen el mayor y el menor rango.

- Las RF obtenidas con la fibra de vidrio “acustifibra”, en la mitad, y la espuma de poliuretano *Lowsound*, implementada en la boca, presentaron los resultados más favorables en lo que refiere la dispersión y la distribución de la presión sonora, exceptuando la RF registrada con la “acustifibra” en la boca. La desviación estándar DE es igual a $0.833 Pa$ y $0.691 Pa$, y el coeficiente de asimetría es equivalente a 2.20 y 1.12.
- La respuesta en frecuencia con la desviación estándar más alta ($DE = 1.350 Pa$), se obtuvo con el *Lowsound* en la garganta, seguidas por la RF medida con este material en la mitad ($DE = 1.265 Pa$) y el *Black Theater* en la garganta ($DE = 1.225 Pa$).
- El mayor rango se obtuvo con la espuma de poliuretano *Lowsound* ubicada en la garganta ($R = 6.38 Pa$), siendo mayor en la banda de octava de $f_c = 1000 Hz$ ($R = 4.15 Pa$) y menor en la banda con $f_c = 2000 Hz$ ($R = 1.08 Pa$).

6.2 Diferencias entre las respuestas en frecuencia medidas, con y sin material absorbente.

La comparación de la respuesta en frecuencia de las bocinas, con y sin material absorbente en su interior, se evaluó considerando las siguientes variables:

- La diferencia del nivel de presión sonora promedio ΔSPL .
- La diferencia de la desviación estándar ΔDE .
- La diferencia del rango ΔR .
- La diferencia del coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$. en otros.

La interpretación de las diferencias Δ se detalla en el ANEXO E. Estas diferencias, calculadas para el rango de frecuencias establecido y para cada banda de octava con una f_c igual a 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, se detallan con las tres bocinas. **Todas las diferencias se muestran en el ANEXO mencionado.** Las doce unidades conformadas en el eje horizontal de las siguientes

Figuras son las respuestas en frecuencia medidas con el material absorbente, indicadas en el mismo orden de la caracterización.

6.2.1 Bocina exponencial de Salmon

En cada una de las mediciones, se observó lo siguiente:

- Todas las diferencias son negativas, indicando que el nivel de presión sonora se redujo al implementar el material absorbente. Considerando el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz, la máxima diferencia del nivel de presión sonora se obtuvo con la fibra de vidrio “acustifibra”, ubicada sobre la abertura de la boca ($\Delta SPL = -13.26 \text{ dB}$). La menor diferencia se registró con la espuma de poliuretano *Lowsound*, ubicada en la garganta ($\Delta SPL = -2.05 \text{ dB}$). En 5 de las 12 respuestas en frecuencia, se registró que la banda de octava con la mayor reducción es la de $f_c = 4000 \text{ Hz}$, donde la mayor diferencia se registra con la “acustifibra” en la boca ($\Delta SPL = -14.75 \text{ dB}$). Por otro lado, en 11 de las mediciones se observó que la banda de octava con $f_c = 500 \text{ Hz}$ se redujo en menor medida el nivel de presión sonora; la menor diferencia se registra con el *Lowsound* ubicado en la garganta ($\Delta SPL = -2.05 \text{ dB}$).
- La desviación estándar disminuye al implementar el material absorbente, el cual varía dependiendo de su ubicación. La disminución más significativa se obtuvo con la “acustifibra” en la boca ($\Delta DE = -1.67 \text{ Pa}$), mientras que la menor reducción se registró con el *Black Theater* en la garganta ($\Delta DE = -0.268 \text{ Pa}$). Se evidencia que en la banda de octava con $f_c = 1000 \text{ Hz}$ se redujo en mayor medida la desviación estándar; en las RF mencionadas anteriormente, las diferencias fueron equivalentes a -2.37 Pa y -0.55 Pa , respectivamente. Se evidencia, en las doce mediciones con los absorbentes, que en la banda de octava con $f_c = 4000 \text{ Hz}$ se reduce en menor medida la desviación estándar. Incluso, con la espuma de poliuretano *Lowsound*, en la garganta y en la mitad, la desviación estándar aumenta: $\Delta DE = 0.56 \text{ Pa}$ y $\Delta DE = 0.08 \text{ Pa}$.
- Las diferencias del rango, de los valores lineales de la presión sonora, fueron negativas en todas las comparaciones. La reducción más significativa se obtuvo con la “acustifibra” ubicada en la boca ($\Delta R = -7.18 \text{ Pa}$), mientras que la menor fue producida con el *Lowsound* en la garganta ($\Delta R = -1.58 \text{ Pa}$). En 9 de las 12 comparaciones, se observa que en la banda de octava con $f_c = 1000 \text{ Hz}$ se reduce el rango en mayor medida respecto a las demás, siendo más significativa en

la “acustifibra” sobre la boca ($\Delta R = -7.6 Pa$). En la banda de octava con $f_c = 4000 Hz$ hubo una diferencia menos significativa ΔR . Incluso, se generó un aumento con el *Lowsound* en la mitad ($\Delta R = 0.08 Pa$).

- Entre el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz, el coeficiente de asimetría aumenta en siete de las doce mediciones hechas con material absorbente implementado. El aumento más significativo se obtuvo con la fibra de vidrio “acustifibra” ubicada sobre la garganta, siendo igual a 0.45. La diferencia con el valor aproximado a 0 se obtuvo con la lana de roca “acustiplaca” en el medio, siendo equivalente a 0.06. La diferencia negativa más significativa se consiguió con la “acustifibra” en la boca ($\Delta \gamma = -0.16$). En la banda de octava con $f_c = 2 kHz$ se evidencia que la diferencia $\Delta \gamma$ es mayor que cero en las doce comparaciones, siendo más significativa en la RF medida con la “acustifibra” en la garganta ($\Delta \gamma = 1.53$). Igualmente, en la banda con $f_c = 1 kHz$ se obtienen diferencias del coeficiente γ mayores que cero, donde la máxima se evidencia con la “acustiplaca” en la garganta ($\Delta \gamma = 0.48$). En las demás bandas de octava se registran diferencias positivas y negativas.

6.2.2 Bocina exponencial rectangular

Las Figuras que muestran las diferencias de las medidas estadísticas descriptivas obtenidas con y sin material absorbente, de la bocina exponencial rectangular, se muestran en el ANEXO E. Para cada una de las medidas, se evidenció lo siguiente:

- La diferencia más significativa del nivel de presión sonora ΔSPL , considerando el rango de frecuencias desde 500 Hz hasta 5 kHz, se obtuvo con la fibra de vidrio “acustifibra” ubicada en la mitad de la bocina, alcanzando a reducir 14.63 dB. Considerando el mismo rango de frecuencias, la menor diferencia [$\Delta SPL = -2.96 dB$] se obtuvo con la espuma de poliuretano *Lowsound*, ubicada en la garganta. En todas las mediciones, se redujo en mayor medida el nivel de presión acústica en la banda de octava con $f_c = 500 Hz$; con la fibra de vidrio “acustifibra”, ubicada en la boca, se evidenció la mayor diferencia $\Delta SPL = -18.75 dB$. En 5 de las 12 comparaciones, se registró una menor diferencia del nivel ΔSPL en la banda de octava con $f_c = 1000 Hz$, donde la diferencia más baja se produjo con el material *Lowsound* sobre la garganta de la bocina ($\Delta SPL = -1.75 dB$). Del mismo modo, se registró una menor reducción del SPL

- en la banda de octava con $f_c = 2000 \text{ Hz}$, donde la disminución más baja se consiguió con la “acustiplaca” ubicada en la boca ($\Delta SPL = -3.06 \text{ dB}$).
- En general, se observó que la desviación estándar DE disminuyó, la cual tiende a reducirse más en la banda con $f_c = 1000 \text{ Hz}$. Con esta banda mencionada, la disminución del DE más considerable se logró con la “acustifibra” en la boca, siendo equivalente a 2.05 Pa , seguido por lo obtenido con este mismo material en la mitad ($\Delta DE = -1.95 \text{ Pa}$). Por otra parte, se evidenció que en la banda de octava con $f_c = 4000 \text{ Hz}$, de las doce RF, la desviación estándar se redujo en menor cantidad. En la medición de la RF hecha con la espuma *Lowsound* sobre la garganta ($\Delta DE = 0.044 \text{ Pa}$) y la mitad ($\Delta DE = 0.048 \text{ Pa}$), se registró un aumento de esta medida. Considerando el rango de frecuencias establecido en la investigación, la disminución de la desviación DE más significativa se obtuvo en la RF medida con la “acustifibra” en la boca ($\Delta DE = -1.90 \text{ Pa}$), seguida por la registrada con el mismo material ubicado en la mitad ($\Delta DE = -1.85 \text{ Pa}$).
 - Considerando las frecuencias de 500 Hz a 5 kHz , el rango R de la RF disminuyó al implementar el material absorbente en la bocina exponencial rectangular. La diferencia más significativa se registró con la “acustifibra” implementada en la boca ($\Delta R = -8.68 \text{ Pa}$). Por otra parte, la diferencia más baja del R se observó con la espuma de poliuretano *Lowsound* sobre la garganta ($\Delta R = -3.8 \text{ Pa}$). Las banda de octava con $f_c = 1000 \text{ Hz}$ y $f_c = 4000 \text{ Hz}$ se caracterizaron por tener la mayor y menor disminución del rango. En la primera banda mencionada, se logra la mayor reducción con la “acustifibra” en la boca ($\Delta R = -7.32 \text{ Pa}$). En la última banda se evidencia un aumento del R en la medición realizada con la espuma de poliuretano *Lowsound* ubicada en la garganta ($\Delta R = 0.32 \text{ Pa}$) y en la mitad ($\Delta R = 0.16 \text{ Pa}$).
 - Entre el rango de frecuencias desde 500 Hz hasta 5 kHz , el coeficiente de asimetría aumenta en 2 de las 12 mediciones realizadas con material absorbente. El aumento del coeficiente γ , indica que los picos de la RF son más significativos. La diferencia ($\Delta \gamma = 0.34$) más alta se registró con la fibra de vidrio “acustifibra”, ubicada en la garganta. Por otro lado, puesto que el coeficiente de asimetría es positivo en la RF medida sin material absorbente ($\Delta \gamma = 1.77$), la reducción de γ representa una distribución más homogénea de la presión sonora; la diferencia ($\Delta \gamma = -0.98$) negativa más significativa se registró con la “acustifibra” en la boca. Por otro lado, considerando las diferencias del coeficiente de asimetría γ por banda de octava, se obtiene

lo siguiente: la distribución es más asimétrica en la banda con $f_c = 2 \text{ kHz}$, donde la diferencia máxima se obtiene con la lana de roca “acustifibra”, ubicada en la mitad ($\Delta\gamma = 1.25$). En las demás bandas de octava, se evidencia que la diferencia del coeficiente γ , o es menor o es aproximadamente igual a cero. Es decir, se obtiene una distribución de la presión sonora más simétrica con el material absorbente. La diferencia negativa más considerable se registró con la fibra de vidrio *Black Theater* en la mitad ($\Delta\gamma = -1.21$), en la banda de octava con ($f_c = 4 \text{ kHz}$).

6.2.3 Bocina cónica

Las Figuras que ilustran las diferencias del nivel de presión sonora ΔSPL , de la desviación estándar ΔDE , del rango ΔR y del coeficiente de asimetría $\Delta\gamma$, obtenidas con y sin material absorbente, de la bocina cónica, se muestran en el ANEXO E. Con lo observado en los resultados, se hicieron las siguientes deducciones:

- Los materiales absorbentes, independientemente de su ubicación, redujeron el nivel de presión sonora de la bocina. Teniendo en cuenta el rango de frecuencias desde 500 Hz hasta 5 kHz, la diferencia más significativa del nivel ΔSPL , se registró con la fibra de vidrio “acustifibra” ubicada en la abertura de la boca, alcanzando a reducir 11.15 dB. La reducción más baja se obtuvo con la espuma de poliuretano *Lowsound*, ubicada en la garganta ($\Delta SPL = -2.3 \text{ dB}$). En las doce comparaciones realizadas, la banda de octava en la que más se redujo el nivel de presión acústica fue aquella con $f_c = 4000 \text{ Hz}$, donde la reducción más significativa se obtuvo con la “acustifibra” en la boca ($\Delta SPL = -13.9 \text{ dB}$). Por el contrario, se evidenció que en 10 de las 12 mediciones realizadas, la banda de octava $f_c = 500 \text{ Hz}$ fue la que menor reducción presentó; con la espuma de poliuretano *Lowsound* en la garganta se registró la diferencia más baja ($\Delta SPL = -1.22 \text{ dB}$).
- Se observó que, en las 12 comparaciones, la desviación estándar DE se redujo. En la banda de octava con $f_c = 1000 \text{ Hz}$, se redujo con mayor significación la desviación estándar DE en 8 de las 12 mediciones con los materiales porosos. La mayor disminución se registró con la “acustifibra” en la boca $\Delta DE = -1.01 \text{ Pa}$. La segunda banda con la reducción más considerable fue la de $f_c = 500 \text{ Hz}$, logrando con la “acustifibra” en la boca de la bocina la mayor disminución $\Delta DE = -1.23 \text{ Pa}$. Por otra parte, en la banda de octava con $f_c = 4000 \text{ Hz}$, se

evidencia menor diferencia en la desviación estándar DE obtenida con y sin material absorbente. Se obtiene una diferencia ΔDE positiva con la espuma *Lowsound*, ubicada en la garganta ($\Delta DE = 0.038 Pa$) y en la mitad ($\Delta DE = 0.080 Pa$). Teniendo en cuenta el rango de frecuencias desde 500 Hz hasta 5 kHz, la desviación estándar DE disminuye en mayor medida con la fibra de vidrio “acustifibra” ubicada en la boca ($\Delta DE = -1.11 Pa$) y con la lana de roca “acustiplaca” sobre la boca ($\Delta DE = -0.87 Pa$).

- Calculando las diferencias ΔR desde la frecuencia de 500 Hz hasta la de 5 kHz, se evidenció que el rango de la RF se redujo con el material absorbente al interior de la bocina cónica. La disminución más significativa se obtuvo con la “acustifibra” implementada en la boca ($\Delta R = -5.92 Pa$). Por otro lado, la reducción más baja se evidenció con la espuma de poliuretano *Lowsound* en la garganta ($\Delta R = -1.50 Pa$). El único aumento se registró en la banda de octava con $f_c = 4000 Hz$, con la espuma *Lowsound* ubicada en la garganta ($\Delta R = 0.13 Pa$) y en la mitad ($\Delta R = 0.18 Pa$).
- En el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz, la diferencia del coeficiente de asimetría γ es positiva en 8 de las 12 comparaciones. La medición de RF donde se evidenció el mayor aumento fue con la “acustifibra” en la mitad ($\Delta \gamma = 1.027$). Por lo cual, la RF mencionada anteriormente tiene una distribución de la presión sonora más asimétrica, afectada por los picos, respecto a la medida sin material poroso. La diferencia $\Delta \gamma$ negativa más considerable se obtiene con la “acustiplaca”, ubicada en la boca ($\Delta \gamma = -0.051$), que por ser aproximadamente cero, se demuestra que su distribución es semejante con la obtenida sin el absorbente. Realizando la comparación por bandas de octava, se evidencia que la diferencia es significativamente alta en la banda de octava con $f_c = 1000 Hz$, siendo mayor con la “acustifibra” ubicada en la mitad ($\Delta \gamma = 1.65$). En las demás bandas, la diferencia $\Delta \gamma$ toma valores positivos y negativos en las 12 comparaciones.

6.3 Relación entre el comportamiento de la respuesta en frecuencia y el coeficiente de absorción de los materiales absorbentes.

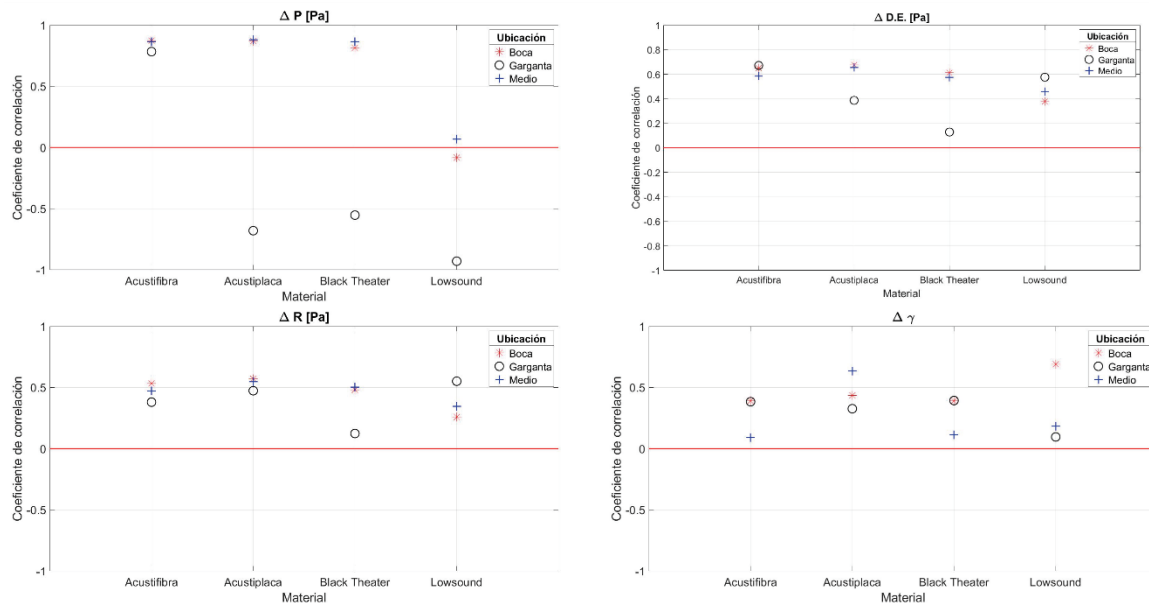
La relación entre el comportamiento de la respuesta en frecuencia, medido con el material absorbente implementado en la bocina, y el coeficiente de absorción α , se determinó a través del coeficiente de

correlación de Pearson r . Esta medida se calculó con la diferencia de la presión sonora promedio ΔP , la diferencia de la desviación estándar ΔDE , la diferencia del rango ΔR y la diferencia del coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$, determinándose por cada ubicación establecida para los cuatro materiales absorbentes.

6.3.1 Bocina exponencial de Salmon

En la siguiente Figura se muestra el coeficiente de correlación r calculado entre las variables que definen el comportamiento de la RF y el coeficiente de absorción α . En cada gráfica, acorde a la leyenda, se puede observar el coeficiente r para cada ubicación del material establecido.

Figura 6-2: Coeficiente de correlación r calculado entre el coeficiente de absorción α y las variables que representan el comportamiento de la RF: la diferencia de presión sonora ΔP , la desviación estándar ΔDE , el rango ΔR y el coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$.



Fuente: propia

Según lo ilustrado en la Figura, se realizan las siguientes deducciones:

- La correlación r entre la diferencia de la presión sonora promedio ΔP y el coeficiente de absorción α es mayor si el material absorbente está ubicado en la mitad de la bocina. La correlación positiva más alta se registró con la lana de roca “acustiplaca” ($r = 0.8816$). La

excepción se ve con la espuma de poliuretano *Lowsound*, donde la correlación de Pearson entre ΔP y α es aproximada a cero ($r = 0.069$), demostrando que no hay relación lineal entre estas variables. La correlación calculada con la diferencia de presión ΔP , obtenida con los materiales absorbentes en la boca, y el coeficiente de absorción α , es similar respecto a la registrada con dichos materiales en la mitad de la bocina; la diferencia más alta entre las correlaciones r obtenidas con los materiales absorbentes en dichas ubicaciones es igual a 0.15, obtenida con la espuma *Lowsound*. Por otra parte, se registra una correlación r negativa en tres de los cuatro materiales absorbentes ubicados en la garganta, indicando que el coeficiente de absorción α y la diferencia ΔP tienen una relación inversamente proporcional. La correlación de Pearson negativa más significativa se obtuvo con el material *Lowsound*, siendo igual a ($r = -0.928$). El caso excepcional se evidenció con la fibra de vidrio “acustifibra”, donde el coeficiente de correlación es positivo ($r = 0.7835$).

- La correlación de Pearson entre la diferencia de la desviación estándar ΔDE y el coeficiente de absorción α es positiva con los cuatro materiales absorbentes ubicados en las tres posiciones establecidas. La correlación positiva más alta ($r = 0.67$) se obtuvo con la lana de roca “acustiplaca” en la boca, mientras que la correlación más baja ($r = 0.12$) se registró con la espuma de poliuretano *Black Theater* en la garganta. Por otro lado, la correlación r más alta obtenida con los materiales absorbentes ubicados en la mitad, se registró con la “acustiplaca” ($r = 0.65$), mientras que la más baja se midió con la espuma *Lowsound* ($r = 0.45$). Con lo anterior, no se puede deducir una relación lineal entre el coeficiente de absorción α y la desviación estándar DE .
- Los coeficientes de correlación calculados para las diferencias del rango ΔR y el coeficiente de absorción α son positivos en los cuatro materiales absorbentes ubicados en las tres posiciones establecidas. La correlación más baja ($r = 0.123$) se registró con la fibra de vidrio *Black Theater* ubicada en la garganta. La correlación más alta ($r = 0.57$) se obtuvo con la lana de roca “acustiplaca” ubicada en la boca. Aunque se evidenció que el rango R de las respuestas en frecuencia se reducía al implementar el material absorbente, con los coeficientes de correlación r hallados no es posible confirmar una dependencia directa del rango con la absorción α .
- Al igual que sucedió con la diferencia del rango ΔR , todas las correlaciones entre el coeficiente de absorción α y las diferencias del coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$ son positivas. La correlación de

Pearson más baja ($r = 0.09$) se registró con la fibra de vidrio “acustifibra” ubicada en la mitad de la bocina. Por otro lado, la correlación más significativa, la cual equivale 0.68, se obtuvo con la espuma *Lowsound* ubicada en la boca. Con estas correlaciones halladas, se concluye que la simetría de la distribución de la presión acústica no depende únicamente del coeficiente de absorción, habiendo factores externos que inciden en este comportamiento.

6.3.2 Bocina exponencial rectangular

La Figura de la correlación de Pearson entre el coeficiente de absorción de los materiales y las diferencias de las medidas descriptivas, obtenidas con la bocina exponencial rectangular, se muestra en el ANEXO E. Con los resultados de la correlación se observa lo siguiente

- La correlación r entre la diferencia de la presión sonora promedio ΔP y el coeficiente de absorción α es significativamente alta con los cuatro materiales absorbentes, en las tres ubicaciones establecidas. La correlación más alta se registró con el *Black Theater* ($r = 0.99$) en la boca. La correlación más baja, aunque sigue siendo significativa, se obtuvo con la fibra de vidrio “acustifibra” ($r = 0.91$) ubicada en la garganta. Con estos resultados, se demuestra que el coeficiente de absorción y la reducción de la presión sonora tienen una relación inversamente proporcional, independientemente de la ubicación del material absorbente implementado en la bocina exponencial rectangular. Dicho de otro modo, la reducción de la presión sonora es mayor en las frecuencias bajas, donde la absorción α es menor.
- La correlación de Pearson, de la diferencia de la desviación estándar ΔDE y el coeficiente de absorción α , es positiva en las mediciones realizadas con los 4 materiales absorbentes. La correlación es más significativa con los materiales porosos en la garganta, obteniendo la más alta con la “acustifibra” ($r = 0.88$) y la más baja con el *Black Theater* ($r = 0.82$). Luego, la correlación es menos significativa con los absorbentes ubicados sobre la abertura de la boca, registrando la correlación más alta ($r = 0.77$) y la más baja ($r = 0.56$) con la lana de roca “acustiplaca” y la espuma de poliuretano *Lowsound*. Con lo anterior, se afirma que el aumento del coeficiente de absorción α produce una menor disminución en la desviación estándar DE de la respuesta en frecuencia.

- Los coeficientes de correlación obtenidos con las diferencias del rango ΔR y el coeficiente de absorción α son positivos en las RF medidas con los cuatro materiales absorbentes, en las tres posiciones establecidas. La correlación más significativa ($r = 0.769$) se obtuvo con la lana de roca “acustiplaca” ubicada en la garganta, mientras que la correlación más baja ($r = 0.45$) se registró con la espuma de poliuretano *Lowsound* sobre la boca. Con estos resultados, se deduce que la diferencia del rango ΔR no tiene una relación lineal con el coeficiente de absorción α , puesto que, como se mencionó en el apartado anterior, dicha diferencia ΔR fue menor en la banda de octava con $f_c = 4000 \text{ Hz}$, donde el coeficiente α es mayor en los cuatro materiales absorbentes.
- Respecto a las diferencias del coeficiente de asimetría $\Delta\gamma$, se registra una correlación de Pearson positiva y negativa. Con la espuma de poliuretano *Lowsound*, se obtuvo las correlaciones más significativas, tanto la positiva ($r = 0.353$) con el material en la garganta, como la negativa ($r = -0.8$) con la espuma en la mitad. Estos resultados demuestran que la distribución de la presión sonora no depende directamente del coeficiente de absorción α del material poroso.

6.3.3 Bocina cónica

La correlación de Pearson entre el coeficiente de absorción α y las diferencias de las medidas estadísticas descriptivas, calculadas con la bocina cónica, son mostradas en el ANEXO E. Con estos resultados, se deduce lo siguiente:

- La correlación de Pearson, entre la diferencia de la presión acústica ΔP y el coeficiente de absorción α , es positiva en todas las RF medidas con la bocina cónica. La ubicación donde se produce la mayor correlación r es en la boca, siendo la lana de roca “acustiplaca” el material que genera la correlación más alta ($r = 0.88$). Por otro lado, en la garganta se produce la correlación menos significativa, obtenida con la espuma de poliuretano *Lowsound* ($r = 0.02$) la más baja. Con estos resultados, se demuestra que el coeficiente de absorción y la diferencia de la presión sonora ΔP no tienen una relación lineal.
- La correlación de Pearson entre la diferencia de la desviación estándar ΔDE y el coeficiente de absorción α es positiva en todas las comparaciones. La correlación es significativamente alta con las RF medidas con los materiales implementados sobre la boca, registrando la más alta con

la “acustiplaca” ($r = 0.88$) y la más baja con la espuma *Lowsound* ($r = 0.69$). Por el contrario, las correlaciones no son significativas con las RF medidas con los materiales sobre la garganta y en la mitad. En la primera ubicación, la correlación más alta ($r = 0.44$) se produjo con la “acustifibra”, mientras que en la segunda ubicación mencionada se registró con el *Lowsound* ($r = 0.40$). Con lo anterior, se deduce que hay una relación directamente proporcional, entre α y ΔDE , únicamente con los materiales porosos ubicados en la boca.

- La correlación r obtenida con las diferencias del rango ΔR y el coeficiente de absorción α es positiva en todas las RF medidas con la bocina cónica. En la abertura de la boca, el material absorbente produjo la correlación más significativa, obteniéndose la más alta r con la lana de roca “acustiplaca” en la boca ($r = 0.84$). Por otro lado, la menor correlación se generó con el material *Black Theater* sobre la garganta ($r = 0.19$). Con lo obtenido, se podría conjeturar que la diferencia del rango ΔR tiene una relación directamente proporcional con el coeficiente de absorción α , sólo cuando el material absorbente está implementado sobre la abertura de la boca. En este caso, el rango R se reduce en mayor medida con la disminución del coeficiente de absorción puesto que la correlación es positiva; como se puede observar en los resultados de las ΔR , en la banda de octava con $f_c = 4000 \text{ Hz}$, donde la absorción α es mayor, la diferencia del rango ΔR es menor.
- Los coeficientes de correlación obtenidos con las diferencias del coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$ son positivos, con los materiales ubicados en la garganta y en la mitad de la bocina. Por otro lado, son negativos con los 3 materiales fibrosos, ubicados en la boca. La correlación positiva más alta se registró con la fibra de vidrio “acustifibra” colocada en la mitad ($r = 0.59$), mientras que la negativa más baja se obtuvo con el *Black Theater* sobre la abertura de la boca ($r = -0.73$). Debido a que la correlación r hallada toma valores mayores y menores a 1, no es posible afirmar que la distribución de p tenga una relación lineal con el coeficiente α .

6.4 Evaluación del efecto que produce el material absorbente en la respuesta en frecuencia de las bocinas.

Hasta esta sección; por un lado, se ha caracterizado y comparado las respuestas en frecuencia de las bocinas medidas con y sin material absorbente en su interior; por el otro lado, se ha determinado la relación entre el coeficiente de absorción α y el comportamiento de la RF, definido en cuatro

variables: las diferencias $\Delta P, \Delta DE, \Delta R$ y $\Delta \gamma$. Sin embargo, no se han emitido juicios sobre estos resultados hallados. En este apartado, los autores pretenden estimar el efecto que se genera en la respuesta en frecuencia de las bocinas debido a la implementación de los materiales absorbentes. Luego, se interpretan los resultados, según la aplicación del sistema, y se proponen las posibles razones que dan su origen.

6.4.1 Aplicación del análisis de la varianza ANOVA.

La estimación del efecto se calcula a través del análisis de la varianza ANOVA de un solo factor, la cual, es una técnica central utilizada en el análisis experimental de datos. Este análisis permite determinar si las medias aritméticas de un conjunto de muestras son iguales o, de lo contrario, difiere por lo menos una muestra debido al efecto dado por un tratamiento. En cada análisis realizado, se corroboró que se cumplieran las siguientes suposiciones idóneas:

- Las k respuestas en frecuencia son independientes entre sí. Las mediciones se realizaron bajo las mismas condiciones, como los equipos utilizados en la misma ubicación y sin un ruido de fondo que repercutiera en la medición de este parámetro.
- La homogeneidad en las varianzas entre el grupo de respuestas en frecuencia analizadas por cada estudio realizado. Debido a que se evidencian diferencias en la desviación estándar ΔDE entre las RF en términos de la presión sonora, se decide hacer el análisis con las RF en valores logarítmicos del nivel de presión sonora [$dB SPL$], con el propósito de que las varianzas sean más semejantes (Hamilton, 1990; Lazar et al., 2017). Luego, se realiza la prueba de Levene para determinar si la homogeneidad se cumple y, aunque este no sea el resultado, se procede igualmente a efectuar el ANOVA y se considera lo obtenido con este test. El nivel de significancia α establecido, en la prueba de Levene, es de 0.05.

Este análisis es aplicado en las RF obtenidas con cada una de las bocinas desarrolladas en el estudio. Primero, se aplica el ANOVA en las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes, ubicados en una de las tres posiciones, y sin material. Luego, se emplea el ANOVA en las RF medidas con uno de los cuatro materiales absorbentes, en las tres ubicaciones establecidas. El nivel de significancia α , de este análisis, es 0.05. La hipótesis nula H_0 se rechaza cuando se cumple la siguiente condición:

- El *valor* – P es menor al nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

El estadístico $F(4,800) = 2.38$ para el análisis realizado con las RF medidas con los materiales absorbentes implementados en una ubicación, y sin material. Por otro lado, el estadístico $F(2,480) = 3.01$ en el análisis realizado con las RF medidas con un mismo material en las tres ubicaciones establecidas.

En todos los casos, se efectúa la comparación múltiple con el método de *Tukey – Kramer*, la cual permite conocer la diferencia de las medias aritméticas por cada tratamiento. El nivel de significancia, definido en esta técnica, es igual a 0.05. A través de MATLAB, se realizó la prueba de Levene, el ANOVA y la técnica de *Tukey – Kramer*. Estos resultados son mostrados en el **ANEXO F** del documento, los cuales, son interpretados a continuación.

Bocina exponencial de Salmon

Al analizar las respuestas en frecuencia medidas sin material y con los materiales absorbentes, en una ubicación específica, se rechaza la hipótesis nula H_0 y, por lo tanto, se concluye que la implementación de los cuatro materiales absorbentes produce un efecto significativo. Los resultados del ANOVA, considerando cada material, son los siguientes:

- Con los materiales absorbentes ubicados en la boca, el resultado del estudio es $F(4,800) = 120.77$, $P = 0.00$, $P < 0.05$, evidenciando que el uso de dichos materiales produce efecto significativo en la respuesta en frecuencia. Las únicas RF que no difieren en sus medias aritméticas, son las medidas con la lana de roca “acustiplaca” ($\mu = 92.8 \text{ dB}$, $DE = 5.37 \text{ dB}$) y con la fibra de vidrio *Black Theater* ($\mu = 92.68 \text{ dB}$, $DE = 5.47 \text{ dB}$). La respuesta en frecuencia medida sin material absorbente es la muestra que se diferencia en mayor medida respecto a las demás RF ($\mu = 100.3 \text{ dB}$, $DE = 6.16 \text{ dB}$). Con estas RF, se corrobora la homogeneidad de las varianzas ($P = 0.8819 > 0.05$).
- Al igual que en el anterior caso, los materiales absorbentes colocados en la garganta de la bocina producen un efecto significativo en la respuesta en frecuencia $F(4,800) = 43.26$, $P = 0.00$. Las RF que tienen una media aritmética sin diferencias estadísticas son las obtenidas con la “acustiplaca” ($\mu = 95.07 \text{ dB}$, $DE = 7.19 \text{ dB}$) y con el *Black Theater* ($\mu = 95.39 \text{ dB}$, $DE =$

6.94 dB). La RF con mayor diferencia es la medida sin material absorbente. En este conjunto de RF no presentan varianzas homogéneas ($P = 0.0089 < 0.05$).

- De la misma manera, los materiales absorbentes ubicados en la mitad de la bocina generan un efecto en la respuesta en frecuencia $F(4,800) = 87.91$, $P = 0.00$. Las RF sin diferencias en sus medias aritméticas son las registradas con la “acustifibra” ($\mu = 89.74$ dB, $DE = 5.61$ dB) y la “acustiplaca” ($\mu = 91.16$ dB, $DE = 5.69$ dB). Estas RF tienen varianzas homogéneas ($P = 0.9104 > 0.05$).

Por otro lado, al emplear el ANOVA en las respuestas en frecuencia obtenidas con el mismo material, ubicado en las tres posiciones establecidas, se obtienen los siguientes resultados:

- Con la fibra de vidrio “acustifibra”, se rechaza la hipótesis H_0 , [$F(2,480) = 12.18$, $P = 0.00$]. Se evidencia que la medición hecha con el material absorbente en la boca ($\mu = 87.38$ dB, $DE = 5.44$ dB) tiene diferencias significativas con la medición efectuada con dicho material en la garganta ($\mu = 90.75$ dB, $DE = 7.55$ dB) y en la mitad ($\mu = 89.74$ dB, $DE = 5.61$ dB). Esto mismo sucede con la lana de roca “acustiplaca” y la fibra de vidrio *Black Theater*. El resultado de la ANOVA con la “acustiplaca” es $F(2,480) = 16.46$, $P = 0.00$, donde la RF obtenida con el material en la garganta ($\mu = 95.07$ dB, $DE = 5.37$ dB) es diferente respecto a la medida con el absorbente en la boca ($\mu = 92.8$ dB, $DE = 7.19$ dB) y en la mitad ($\mu = 91.16$ dB, $DE = 5.69$ dB). El resultado del análisis con el *Black Theater* es $F(2,480) = 8.01$, $P = 0.0004$, siendo la RF, obtenida con la fibra de vidrio en la garganta ($\mu = 95.34$ dB, $DE = 6.94$ dB), la única que presenta diferencia respecto a la registrada con el material en la boca ($\mu = 92.68$ dB, $DE = 5.47$ dB) y en la garganta ($\mu = 93.77$ dB, $DE = 5.83$ dB). Con la espuma de poliuretano [$F(2,480) = 0.64$, $P = 0.529 > 0.05$] se acepta la hipótesis H_0 , demostrando que no hay diferencias significativas en las medias aritméticas. Con la prueba de Levene, se obtuvo que las RF medidas tienen varianzas homogéneas únicamente con la espuma *Lowsound* ($P = 0.346 > 0.05$).

Bocina exponencial rectangular

Al hacer el ANOVA de las RF medidas sin material y con cada uno de los cuatro materiales, ubicados en una de las tres posiciones, se obtienen efectos significativamente diferentes. Es decir, se rechaza la hipótesis nula H_0 .

- Con el resultado del análisis de la varianza, se determina que el efecto en la RF es significativo al implementar cada uno de los cuatro materiales porosos ubicados en la boca [$F(4,800) = 97.65$, $P = 0.00$, $P < 0.05$]. Las RF que no presentan diferencias en sus medias aritméticas son las medidas con la “acustiplaca” ($\mu = 93.71 \text{ dB}$, $DE = 4.98 \text{ dB}$) y con la espuma *Lowsound* ($\mu = 94.27 \text{ dB}$, $DE = 6.56 \text{ dB}$). Se demuestra que la RF medida sin material absorbente tiene la mayor diferencia en su media aritmética respecto a las demás respuestas en frecuencia ($\mu = 98.82 \text{ dB}$, $DE = 7.28 \text{ dB}$). Estas RF no tienen varianzas homogéneas ($P = 0 < 0.05$).
- Los materiales absorbentes, ubicados en la abertura de la garganta, producen un efecto significativo en la respuesta en frecuencia $F(4,800) = 44.49$, $P = 0.00$. Las RF que no se diferencian por su media aritmética, son las obtenidas con la “acustifibra” ($\mu = 90.7 \text{ dB}$, $DE = 7.06 \text{ dB}$), con la “acustiplaca” ($\mu = 91.01 \text{ dB}$, $DE = 6.37 \text{ dB}$). Al igual que en la boca, la RF con mayor diferencia es la medida sin material absorbente. Este conjunto de RF no presenta varianzas homogéneas ($P = 0.0031 < 0.05$).
- En la mitad de la bocina también se genera un efecto significativo en la RF, al implementar cada uno de los materiales absorbentes $F(4,800) = 115.36$, $P = 0.00$. Todas las RF presentan diferencias significativas en la media: la “acustifibra” ($\mu = 85.74 \text{ dB}$, $DE = 4.74 \text{ dB}$), la “acustiplaca” ($\mu = 89.99 \text{ dB}$, $DE = 5.11 \text{ dB}$), el *Black Theater* ($\mu = 92.65 \text{ dB}$, $DE = 5.22 \text{ dB}$) y el *Lowsound* ($\mu = 94.76 \text{ dB}$, $DE = 6.32 \text{ dB}$), no difieren significativamente. Estas RF no tienen varianzas homogéneas ($P = 0 < 0.05$).

De la misma manera, se acepta la hipótesis alternativa H_A al comparar las RF medidas con cada material, en las tres ubicaciones establecidas. Los resultados del ANOVA, para esta comparación, fueron los siguientes:

- La hipótesis H_0 se rechaza al implementar el material absorbente “acustifibra” [$F(2,480) = 37.29$, $P = 0.00$]. Este material, implementado en garganta ($\mu = 90.7 \text{ dB}$, $DE = 7.06$), produce una diferencia significativa en la RF respecto a la respuesta en frecuencia medida con el respectivo material ubicado en la boca ($\mu = 86.6 \text{ dB}$, $DE = 4.29 \text{ dB}$) y en la mitad

($\mu = 85.74 \text{ dB}$, $DE = 4.74 \text{ dB}$). Con la “acustiplaca” [$F(2,480) = 19.43$, $P = 0.00$], se observa que la RF medida con el respectivo material, ubicado en la boca ($\mu = 93.71 \text{ dB}$, $DE = 4.98 \text{ dB}$), tiene una media aritmética diferente con las RF restantes. El análisis de la varianza aplicado a las RF medidas con el *Black Theater* [$F(2,480) = 7.77$, $P = 0.0005$] evidencia una diferencia significativa, producida por la RF medida con el material mencionado en la boca ($\mu = 91.81 \text{ dB}$, $DE = 4.65 \text{ dB}$) y en la garganta ($\mu = 93.97$, $DE = 5.01 \text{ dB}$). Con la espuma de poliuretano *Lowsound* [$F(2,480) = 3.35$, $P = 0.03$], la diferencia significativa se registra con dicho material en la garganta ($\mu = 96.14 \text{ dB}$, $DE = 6.78 \text{ dB}$). Al aplicar la prueba de Levene, se determina que las RF medidas con el *Black Theater* ($P = 0.810 > 0.05$) y con el *Lowsound* ($P = 0.806 > 0.05$) tienen varianzas homogéneas entre sí.

Bocina cónica

Con los resultados del ANOVA empleado para comparar la RF medido sin material absorbente y con los cuatro materiales ubicados en cada una de las tres posiciones definidas, se rechaza la hipótesis nula H_0 . Los resultados del análisis de la varianza son:

- Por cada respuesta en frecuencia generada con los materiales absorbentes en la boca, y sin material absorbente, se genera un efecto significativamente diferente [$F(4,800) = 78.87$, $P = 0.00$]. Con la comparación múltiple, se observa que las medias aritméticas de la RF medida con la “acustiplaca” ($\mu = 93.7 \text{ dB}$, $DE = 5.53 \text{ dB}$) y con el *Black Theater* ($\mu = 93.4 \text{ dB}$, $DE = 5.92 \text{ dB}$) no presentan diferencias estadísticas. La RF con la mayor diferencia es la obtenida con la bocina sin material absorbente ($\mu = 100.2 \text{ dB}$, $DE = 6.18 \text{ dB}$). Estas RF tienen varianzas homogéneas ($P = 0.606 > 0.05$).
- Los materiales porosos sobre en la abertura de la garganta producen un efecto estadísticamente diferente en la respuesta en frecuencia [$F(4,800) = 65.92$, $P = 0.00$]. Las RF sin diferencias respecto a su media aritmética, son las obtenidas con la “acustifibra” ($\mu = 91.3 \text{ dB}$, $DE = 6.94 \text{ dB}$), con la “acustiplaca” ($\mu = 90.6 \text{ dB}$, $DE = 7.04 \text{ dB}$). La RF con mayor diferencia estadística, respecto a las demás, es la medida sin material absorbente. Estas RF no presentan varianzas homogéneas ($P = 0.011 < 0.05$).
- Con cada material absorbente ubicado en la mitad de la bocina, también se produce un efecto significativamente diferente en la RF [$F(4,800) = 78.2$, $P = 0.00$]. A través de la comparación

múltiple, se evidenció que las medias de las RF con la “acustifibra” ($\mu = 89.9 \text{ dB}$, $DE = 6.61 \text{ dB}$) y con la “acustiplaca” ($\mu = 90.91 \text{ dB}$, $DE = 6.42 \text{ dB}$) no presentan diferencias estadísticas. Con este análisis también se determina que la RF con la media aritmética con más diferencia, respecto a las demás, es la obtenida con sin material absorbente. Estas respuestas en frecuencia tienen varianzas homogéneas ($P = 0.8903 > 0.05$).

Los resultados del ANOVA realizado para comparar el efecto de las respuestas en frecuencia medidas al cambiar la ubicación de cada material absorbente, son los siguientes:

- Se rechaza la hipótesis H_0 con los materiales absorbentes, “acustifibra” [$F(2,480) = 4.89$, $P = 0.0079$], “acustiplaca” [$F(2,480) = 11.73$, $P = 0.00$] y *Black Theater* [$F(2,480) = 5.61$, $P = 0.0039$], evidenciando diferencias significativas en las RF. La “acustifibra” ubicada en la boca ($\mu = 91.3 \text{ dB}$, $DE = 5.98 \text{ dB}$) produce una media aritmética estadísticamente diferente respecto a la obtenida en la garganta ($\mu = 89.05 \text{ dB}$, $DE = 6.94 \text{ dB}$). Igualmente, las medias de la RF obtenidas con el *Black Theater* sobre la boca ($\mu = 93.43 \text{ dB}$, $DE = 4.65 \text{ dB}$) y la garganta ($\mu = 95.63 \text{ dB}$, $SD = 5.01 \text{ dB}$), son significativamente diferentes. Con la “acustiplaca” en la boca se obtiene una diferencia significativa ($\mu = 93.73 \text{ dB}$, $DE = 4.98 \text{ dB}$). Se acepta la hipótesis H_0 con la espuma de poliuretano *Lowsound* [$F(2,480) = 0.55$, $P = 0.578 > 0.05$], donde no se evidencian diferencias significativas en las medias. Únicamente, al efectuar la prueba de Levene, se obtiene homogeneidad en las varianzas de las RF medidas con el *Black Theater* ($P = 0.456 > 0.05$) y el *Lowsound* ($P = 0.939 > 0.05$).

6.4.2 Interpretación de los resultados

La implementación de los materiales absorbentes, en una ubicación específica de la bocina, causa un efecto significativo en la media aritmética de la respuesta en frecuencia. En todos los resultados se rechazó la hipótesis nula H_0 , deduciendo que, por lo menos, una de las respuestas en frecuencia es estadísticamente diferente respecto a las demás. Con la comparación múltiple de *Tukey – Kramer*, en las tres bocinas desarrolladas, se demostró que la RF sin material absorbente es significativamente diferente respecto a las medidas con los cuatro materiales absorbentes, independientemente de su ubicación.

En la mayoría de las comparaciones hechas con la presión sonora promedio Δp , con el rango ΔR y con la desviación estándar ΔDE , se obtuvo una diferencia negativa que representa, en otras palabras, reducción. Para la primera variable mencionada, la reducción es desfavorable puesto que implica disminuir la eficiencia que genera la bocina al acoplar la impedancia del transductor con la del medio de propagación. Para la segunda variable descrita, la reducción es favorable, pues indica que la diferencia entre el máximo y el mínimo de la presión sonora disminuye. Para la tercera variable indicada, la disminución es favorable puesto que demuestra que al usar el material absorbente, la dispersión de la presión sonora p , respecto a su media aritmética, se reduce igualmente. Por otra parte, la diferencia del coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$ fue positiva y negativa en algunas RF. Puesto que los coeficientes de asimetría de las respuestas en frecuencia medidas sin material absorbente son mayores a 0, una diferencia $\Delta \gamma$ positiva indica que la distribución es más asimétrica con el material absorbente implementado, donde los picos se tornan más significativos. De manera contraria, una diferencia $\Delta \gamma$ negativa quiere decir que los picos de la RF disminuyen su significancia y, por ende, la distribución de p se torna más simétrica.

Las diferencias de las medidas estadísticas, calculadas en el rango de frecuencias y en cada banda de octava, varían dependiendo de la ubicación del material absorbente. Con el ANOVA realizado en las RF medidas con cada material poroso en las tres ubicaciones, se determinó una diferencia significativa en la mayoría de casos, excepto con la espuma de poliuretano *Lowsound* en la bocina exponencial de Salmon y la bocina cónica. Con la comparación múltiple de *Tukey – Kramer* se comprueba que, en la mayoría de casos, la RF medida con el material poroso en la garganta tiende tener mayor diferencia significativa. Y esta diferencia es evidente en las comparaciones con Δp , ΔDE y ΔR , donde las RF obtenidas con los absorbentes en la abertura de la garganta tienden a: reducir la presión sonora, el rango y la desviación estándar menor medida.

Asimismo, el coeficiente de correlación calculado entre las diferencias Δp , ΔDE y ΔR , y el coeficiente de absorción α , varía con la ubicación del material poroso. En las tres bocinas, se obtuvo un coeficiente r positivo en las RF medidas con los materiales en la boca. El valor más significativo se observa con la bocina exponencial rectangular, con un $r = 0.99$, un $r = 0.78$ y un $r = 0.72$ para la primera, segunda y tercera diferencia mencionada. Estas correlaciones positivas indican que el coeficiente de absorción α y las diferencias Δp , ΔDE y ΔR , tienen una relación lineal directamente proporcional, expresando que con el aumento el coeficiente α , la reducción de la presión sonora

promedio, de la desviación estándar y del rango es menor. Evidentemente, la idea descrita anteriormente parece ilógica, pues al ser mayor α también lo debe ser la energía sonora absorbida.

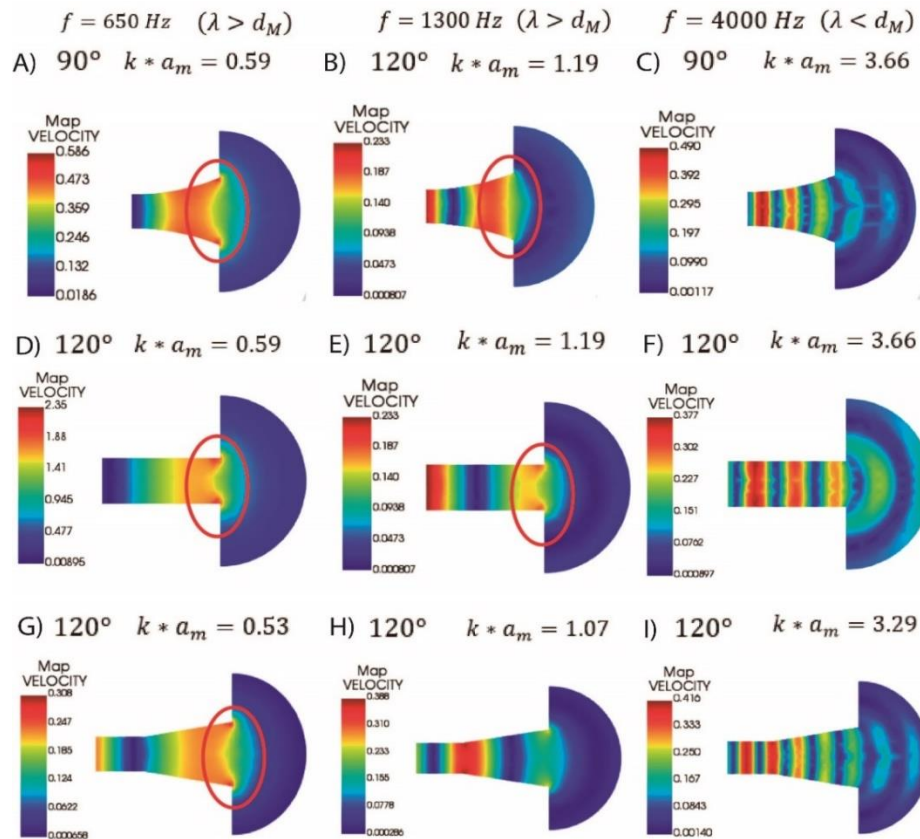
Con todo lo mencionado anteriormente, se deduce que el comportamiento de la respuesta en frecuencia, al implementar el material absorbente, depende implícitamente de otros factores como la velocidad de partícula v y las ondas estacionarias propagadas al interior de las bocinas, así como la longitud de onda λ de la señal transmitida. A través de la simulación en ACTRAN VI, basada en el método de los elementos finitos, se observa la propagación de la energía sonora al interior de las bocinas. Se escogieron frecuencias en las que λ es menor y mayor que la longitud de la boca d_M , y en las cuales la relación de Keele ($a_M * k$) es mayor y menor a 1. En el **ANEXO J** están las Figuras que ilustran el comportamiento de la velocidad de partícula v en las frecuencias de 650 Hz, 1300 Hz y 4000 Hz, mostrándose a diferentes grados del desplazamiento ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ y 150°) que simula el dominio de la garganta *Acoustic_Excitation*, el cual representa la vibración del diafragma del *driver* de compresión.

Con estas Figuras, en las frecuencias con $\lambda > d_M$ (650 Hz, 1300 Hz) se observa que el frente de onda se deforma cuando llega a la abertura de la boca. Cierta cantidad de la velocidad de partícula se propaga hacia el aire, mientras que la cantidad restante, o se refleja hacia el interior de la bocina, o se concentra en los bordes de dicha abertura. Por otro lado, en la frecuencia con $\lambda > d_M$ (4000 Hz), el frente onda se propaga libremente sin producirse concentración o reflexiones de la velocidad de partícula. Este fenómeno se puede ver en la Figura 6-3, la cual ilustra el campo acústico en los grados donde el frente de onda está sobre la boca. Los círculos rojos indican la curvatura que toma la velocidad v con dirección hacia la garganta, evidenciado en las frecuencias con $\lambda > d_M$. Estos círculos indican, en otras palabras, la onda estacionaria que se propaga al interior y que afecta la linealidad de la respuesta en frecuencia de las bocinas.

La deformación del frente de onda se da únicamente sobre la boca. Por otra parte, la velocidad de partícula de la onda reflejada disminuye parcialmente en la mitad y, en las Figuras del **ANEXO J**, se observa que el frente de onda de la señal reflejada no alcanza a llegar la garganta, y que los máximos de la velocidad v producida en este punto, corresponde con la onda generada por la superficie vibrante.

Las diferencias negativas de la presión sonora promedio Δp , de la desviación estándar ΔDE y del rango ΔR demuestran que los materiales porosos absorben la energía de las ondas sonoras, disipándola térmicamente. Sin embargo, se considera que la absorción depende más por el comportamiento de la velocidad de partícula producida donde se ubique el material poroso, que por el coeficiente de absorción α entregado por los fabricantes. Específicamente, la absorción depende de la velocidad v que genera las ondas reflejadas cuando el frente de onda llega a la abertura de la boca, la cual disminuye a medida que aumenta la frecuencia debido a que la reflexión es menor.

Figura 6-3: Simulación del campo acústico, de las bocinas desarrolladas en la investigación, en términos de la velocidad de partícula v [m/s]¹⁹.



Fuente: propia

¹⁹ En la primera, segunda y tercera fila de Figuras, se muestra la bocina exponencial de Salmon, la bocina exponencial rectangular y la bocina cónica, respectivamente. Las unidades de la velocidad son los metros por segundo [m/s]

Finalmente, y en términos generales, no es posible determinar cuál es el material absorbente más favorable. Según la desviación estándar, la cual es sinónimo de fluctuación de la RF respecto a la presión sonora promedio, la fibra de vidrio “acustifibra” ubicada en la boca produce la desviación estándar más baja en la bocina exponencial de Salmon ($DE = 0.412 Pa$), en la bocina exponencial rectangular ($DE = 0.229 Pa$) y en la bocina cónica ($DE = 0.454 Pa$). Así mismo, en las tres bocinas, el rango disminuye en mayor cantidad con fibra de vidrio “acustifibra” ubicada en la boca, siendo igual a $1.8 Pa$, $0.93 Pa$ y $1.96 Pa$, según el orden de las bocinas mencionado previamente. En este punto los autores deducen que, a pesar de la disminución del nivel de presión sonora promedio ΔSPL , el uso del material absorbente disminuye la fluctuación de las RF, y que este beneficio podría reflejarse en todo el ángulo de cobertura que la bocina radie.

7. Capítulo VII. Conclusiones y recomendaciones.

7.1 Conclusiones

- Con el propósito de caracterizar la respuesta en frecuencia RF medida con las tres bocinas desarrolladas, con y sin material absorbente, se desarrolló una metodología que hace uso de las medidas estadísticas descriptivas. La fluctuación de la RF se describe a través del diagrama de cajas y bigotes, la desviación estándar DE , el rango R y el coeficiente de asimetría γ , los cuales son unos indicadores de la dispersión y la distribución de la presión sonora respecto a su promedio. La mayoría de los resultados de estas medidas se vieron más favorecidos al implementar el material absorbente en el interior de las bocinas: en la exponencial de Salmon ($DE = 0.412 Pa, \gamma = 1.57, R = 1.8 Pa$), la exponencial rectangular ($DE = 0.229 Pa, \gamma = 0.78, R = 0.93 Pa$) y en la cónica ($DE = 0.454 Pa, \gamma = 1.02, R = 1.96 Pa$), fue la fibra de vidrio “acustifibra” en la boca. Estas medidas se calcularon considerando el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz, y por bandas de octava, donde se evidencia, de forma general, mayor dispersión y una distribución más asimétrica de la presión acústica en la banda con $f_c = 1000 Hz$.
- Las diferencias del comportamiento de la RF, medidas con y sin material absorbente, se calcularon considerando el nivel de presión sonora promedio ΔSPL , la desviación estándar ΔDE , el rango ΔR y el coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$. Las diferencias ΔSPL , que en su totalidad fueron negativas, confirman que la implementación del material absorbente disminuye el nivel de presión acústica, afectando la eficiencia que genera las bocinas, siendo una de las razones principales de uso. La reducción más significativa se obtuvo con la “acustifibra” en la mitad de la bocina exponencial rectangular ($\Delta SPL = -14.69 dB$), mientras que la espuma de poliuretano *Lowsound*, ubicado en la garganta, fue el material que menos disminuyó el SPL . El rango también se redujo con los 4 materiales absorbentes, obteniendo la más significativa con la

“acustifibra” en la boca de la exponencial rectangular ($\Delta R = -8.68 Pa$). En general, la desviación estándar disminuyó al usar los materiales absorbentes, disminuyendo en mayor medida al implementarlos en la boca; el caso más favorable se registró con la “acustifibra” en la boca de la exponencial rectangular ($\Delta DE = -1.90 Pa$). Por otro lado, la distribución de la presión p fue más simétrica con ciertos materiales porosos, aunque no se dedujo una ubicación general en la que obtuviera un γ más favorable. La RF con la mayor asimetría se obtuvo con la “acustifibra” en la mitad de la cónica ($\Delta \gamma = 1.02, \gamma = 2.2$), mientras que con esta misma fibra de vidrio, sobre la boca de la exponencial rectangular, se registró la RF más simétrica ($\Delta \gamma = -0.98, \gamma = 0.78$). Con la disminución de la desviación estándar y el rango, se concluye que la implementación del material absorbente reduce la fluctuación de la respuesta en frecuencia de una bocina con dimensiones reducidas.

- Al observar que las diferencias Δ de las medidas estadísticas varían con el material absorbente implementado en una de las tres ubicaciones establecidas, se calcularon estas mismas diferencias Δ por banda de octava, y se determinó su relación con el coeficiente de absorción α a través de la correlación de Pearson r . Se obtuvo una relación lineal directamente proporcional con la presión sonora promedio Δp , la desviación estándar ΔDE y el rango ΔR de las RF medidas con los materiales sobre la boca, donde la más significativa ($r = 0.99$ en Δp) se consiguió con el *Black Theater* en la bocina exponencial rectangular. Esto demuestra ilógicamente que dichos materiales absorben en mayor cantidad la energía acústica a medida que su coeficiente α disminuye. A través de la simulación del campo acústico de las bocinas en 3D, hecha con el método de los elementos finitos FEM, en la versión estudiantil del software ACTRAN VI, y con la revisión de la literatura, se demuestra que los materiales porosos utilizados absorben la energía de las bajas frecuencias en mayor medida, debido a que la velocidad de partícula v de las ondas reflejadas es mayor en estas frecuencias, donde la longitud de onda λ es mayor que la longitud de la boca d_M .
- La implementación de los cuatro materiales absorbentes produjo, en términos estadísticos, un efecto significativo en la respuesta en frecuencia de las tres bocinas. Por medio de las herramientas que brinda el software MATLAB, fue posible efectuar el método estadístico ANOVA, la técnica de comparación *Tukey-Kramer* y la prueba de Levene. Mediante el análisis de la varianza ANOVA, se evidenció que la media aritmética de las RF es diferente, con y sin

material poroso. Por otro lado, debido a las diferencias encontradas en las medidas descriptivas de las RF medidas con un mismo material en las tres ubicaciones establecidas, se realizó el ANOVA comparando dichas muestras. Con lo anterior, se demostró que no se produce un efecto significativo en la RF al cambiar la ubicación del material, únicamente, en los siguientes casos: el *Lowsound* [$F(2,480) = 0.55$, $P = 0.578$] en la bocina cónica; el *Lowsound* [$F(2,480) = 0.64$, $P = 0.529$] en la bocina exponencial de Salmon. La condición de la homogeneidad de las varianzas se corroboró con la prueba de Levene, la cual fue válida en 9 de las 21 comparaciones realizadas. Por medio de la comparación múltiple de *Tukey-Kramer*, se obtiene que las RF medidas con los materiales porosos en la garganta, tienden a diferenciarse respecto a las demás, y esto es reflejado en que la presión Δp , el rango ΔR y la desviación ΔDE son menos reducidas. Con la simulación basada en el FEM, se demuestra que esto sucede debido al comportamiento de la velocidad de partícula v de la onda reflejada, la cual se concentra en la abertura de la boca.

7.2 Recomendaciones

- El uso de los materiales absorbentes reduce la irregularidad o fluctuación de la respuesta en frecuencia de una bocina con dimensiones reducidas. A pesar de que reduzca el nivel de presión sonora promedio, afectando la eficiencia que produce el sistema, el rizado de la RF puede disminuir dependiendo de la ubicación que se establezca del material poroso. Es posible que los beneficios que conlleva usar estos materiales se obtenga en todo el ángulo de cobertura del sistema, y no sólo en el eje, lugar donde se realizaron las mediciones en el trabajo. Por esto, si se desea continuar con esta investigación, se recomienda efectuar las mediciones en diferentes ángulos para confirmar esta hipótesis.
- Con el cálculo de la correlación de Pearson r entre el coeficiente de absorción α y las diferencias de las medidas estadísticas planteadas (Δp , ΔDE , ΔR , $\Delta \gamma$), y al no hallar una relación lineal, se recomienda caracterizar los materiales porosos que se utilicen en las investigaciones futuras y, de esta manera, se puedan tener más indicadores que describan el desempeño del absorbente. Con esto, se podría obtener una relación entre los indicadores y el comportamiento de la respuesta en frecuencia de la bocina. En especial, la porosidad ε y el flujo de resistividad σ , ya que pueden ser ingresados en un software de simulación, que puede ser ACTRAN VI, ANSYS, COMSOL, etc., y así simular el material absorbente al interior de las bocinas. También se deben considerar los factores intrínsecos que influyen en la cantidad del coeficiente de absorción, y

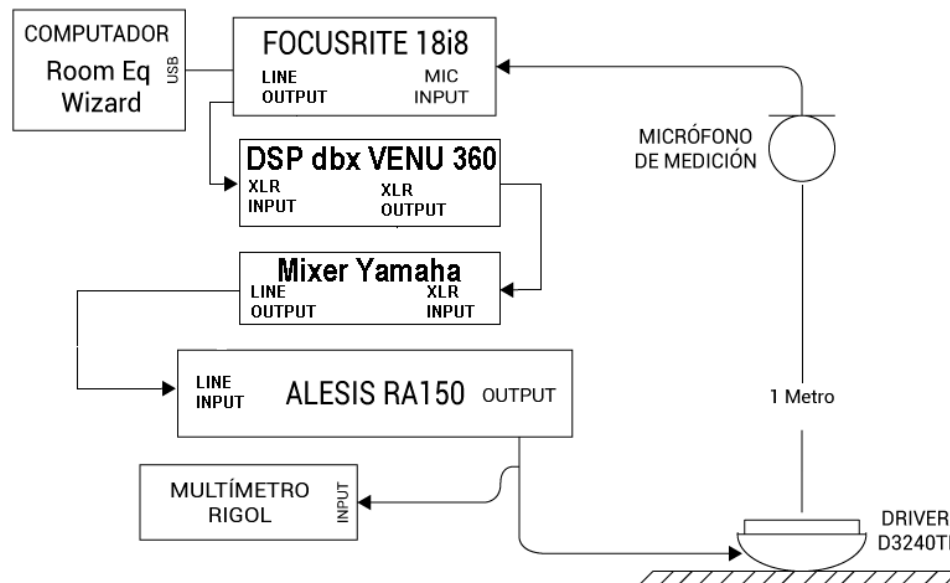
que dependen del medio de propagación. La absorción se asocia también con la viscosidad y la conducción térmica, entre otras variables definidas según el grosor de la lámina (Kinsler et al., 1950). Por lo tanto, se sugiere utilizar láminas de materiales absorbentes con diferentes espesores. A través del método de los elementos finitos FEM, es posible realizar simulaciones del sistema, en 2D y 3D, obtener la RF y el campo acústico, y con el análisis de componentes principales ACP demostrar que son significativamente correlacionadas con las mediciones, tal como sucedió en esta investigación con la bocina exponencial de Salmon ($r = 0.829$) y la bocina exponencial rectangular ($r = 0.896$).

- El enfoque de esta investigación es cuantitativo, y por esto, los resultados son datos numéricos que fueron analizados por medio de métodos estadísticos lineales. Las bocinas, siendo uno de los sistemas empleados en aplicaciones sonoras de alta fidelidad, son utilizadas por ingenieros, músicos y aficionados del tema. Aunque se haya evaluado el efecto que produce la implementación del material absorbente en la respuesta en frecuencia, el juicio y la perspectiva de los usuarios expertos deben tomarse en cuenta. Por ende, se sugiere llevar a cabo una investigación cualitativa con la finalidad de determinar, en su totalidad, si el uso de los materiales absorbentes mejora el desempeño y la tonalidad de las bocinas.
- Si las mediciones acústicas de un determinado sistema de sonido no se pueden efectuar en una cámara anecoica, se recomienda llevar a cabo diferentes configuraciones de medición, realizar una simulación del problema acústico con el método de elementos finitos FEM y, por medio de métodos estadísticos como el análisis de componentes principales, comparar las simulaciones y las mediciones para determinar la configuración óptima. Todo esto, con el fin de medir con mayor precisión la variable, que bien puede ser la respuesta en frecuencia, la respuesta al impulso, el patrón directivo, entre otras. En esta investigación, se demostró que la configuración idónea de medición de la respuesta frecuencia consistió en colocar la bocina sobre el suelo, y no suspendida en una base, puesto que se evita el filtro peine producido por las reflexiones del piso.

A. Anexo: método alternativo del ajuste de la RF del *driver* de compresión

Durante el desarrollo ingenieril, se empleó un método con el fin de ajustar la respuesta en frecuencia del *driver* de compresión D3240TI, para que fuese plana en el rango de frecuencias establecido en la investigación. De este modo, la fluctuación de la RF obtenida sería producida por las ondas estacionarias al interior de la bocina, evitando medir el comportamiento no-lineal del respectivo *driver*. Para efectuar la compensación o el ajuste de la RF del transductor, se aplicaron filtros paramétricos al barrido sinusoidal desde el procesador digital de señal *dbx VENU360*. Los equipos utilizados para esta medición son mostrados en la siguiente Figura:

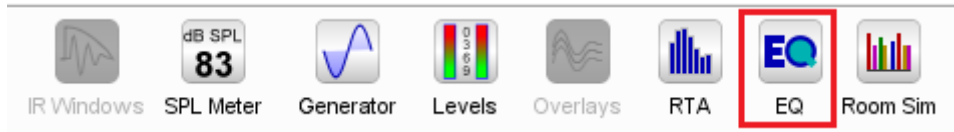
Figura A-1: Diagrama de conexión de los equipos utilizados en la medición de la RF del *driver* de compresión D3240TI.



Fuente: propia

El software *Room Eq Wizard*, utilizado para medir la respuesta en frecuencia, a través de la función EQ indicada en la siguiente Figura, muestra el valor parámetros que debe tener los filtros para reducir la variación de la RF. El usuario ingresa el rango de frecuencias en el que pretende calcular dichos filtros.

Figura A-2: Función EQ del software de medición Room EQ Wizard.



Fuente: propia

Los resultados que suministra el software son los siguientes; la frecuencia central f [dB], el factor de calidad Q y la ganancia G [dB]. Con la medición de la respuesta en frecuencia, del *driver* D3240TI, el software *REW* calculó los siguientes filtros:

Tabla A-1: Parámetros de los filtros propuestos por el programa REW, para corrección de la respuesta en frecuencia obtenida.

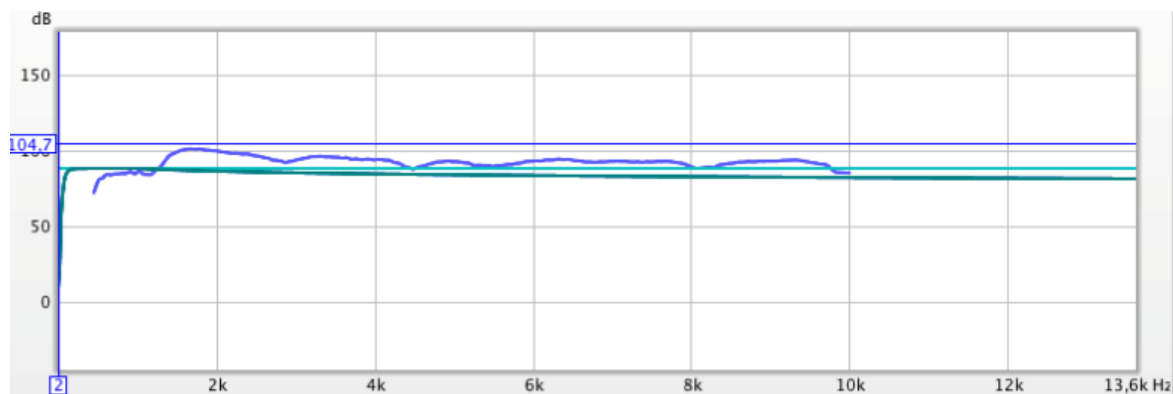
f_c [Hz]	G [dB]	Q
2804	-9,9	1
1745	-8,5	1,8
4474	9	5
4881	-7,5	5
4185	-6,1	5
2857	5,8	4,94
1552	-2,1	5
3316	-2,5	4,99

Fuente: propia

Estos filtros son ingresados dentro de la opción de ecualización que cuenta el DSP *dbx VENU360*. Posteriormente, se efectúa la medición de la RF con los filtros aplicados, mostrada en la Figura A-3. Aunque la ecualización de la señal de excitación redujo la fluctuación de la RF, este método se descarta por las siguientes razones:

- La variación de la respuesta en frecuencia seguía siendo mayor que 3dB, considerándose un comportamiento no-lineal que evitaría obtener con precisión el rizado de la RF producido por las bocinas.
- En el DSP se implementan filtros tipo Butterworth de cuarto orden, con una pendiente de 24 dB/Octava . Esto, debido a que el software REW automáticamente realiza el ajuste en la respuesta en frecuencia utilizando dicho tipo de filtro. No obstante, estos generan desfases a la señal de excitación, evitando medir la RF de manera precisa.

Figura A-3: Respuesta en frecuencia del *driver* de compresión D3240TI, ajustada con los filtros paramétricos aplicados con el DSP *dbx VENU360*.



Fuente: propia

B. Anexo: programa para el diseño y el procesamiento de datos

Durante la investigación se desarrolló un programa en el software de cálculo MATLAB 2017b. Se realizó con el propósito de llevar a cabo los diseños de las bocinas y analizar los resultados de las respuestas en frecuencia. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se estableció que dicho programa estuviera conformado por dos partes nombrados de la siguiente manera; diseño de bocinas y resultados.

La interfaz gráfica de usuario GUI se generó a partir de las líneas de código con el fin de que el lector pueda utilizarla. A lo largo de este Anexo se explica el funcionamiento del programa y se comparte el código.

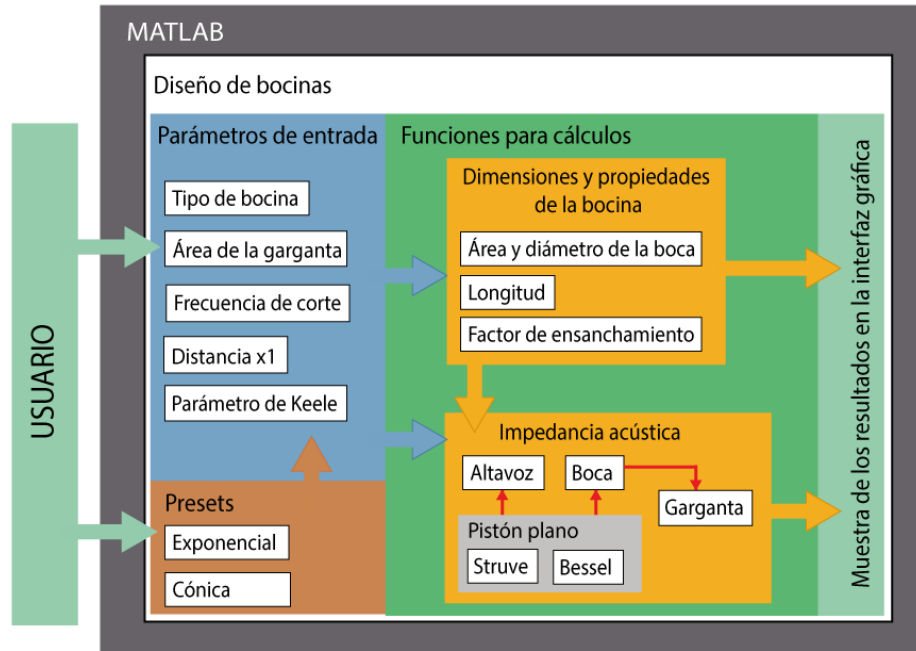
Diseño de bocinas

Este programa está compuesto por un código principal, nombrado *Gui_general*, el cual fue utilizado para ilustrar las propiedades en la interfaz gráfica, como los resultados y la impedancia acústica de radiación, y también fue útil para adquirir los valores de entrada.

Como se observa en la Figura B-1, se desarrollaron unas funciones externas que llevan a cabo cálculos específicos; de las dimensiones y propiedades de la bocina, y de la impedancia acústica de radiación. Esas funciones recibieron los siguientes nombres; *Dimensión_Bocinas.m* y *Calcular_Impedancias.m*, respectivamente. Una vez se adquieren los valores de entrada, en el código principal se hace un llamado a la función que determina las dimensiones de la bocina. Dicha función utiliza los valores ingresados y calcula las propiedades respectivas. Luego, en el código general se llama la función que calcula la impedancia acústica de altavoz, la garganta y la boca de la bocina. Tal como describe la literatura (Beranek, 1954), teniendo en cuenta la medida de sus radios, la impedancia del altavoz y de la boca deben ser asumidas como la impedancia de un pistón plano radiando sobre un panel infinito. Para estas impedancias es necesario recurrir la función de Bessel,

disponible en MATLAB, y la función de Struve. En la última, se usó código libre desarrollado por el profesor T.P. Theodoulidis y disponible en la página de MathWorks.

Figura B-1: Respuesta en frecuencia del *driver* de compresión D3240TI, ajustada con los filtros paramétricos aplicados con el DSP *dbx VENU360*.



Fuente: propia

Al obtener todos los resultados, se ilustran las gráficas y las propiedades desde el código principal. Los botones *presets* definen automáticamente los valores de entrada, y el programa realiza el proceso mencionado con antelación, para ilustrar las propiedades de las bocinas desarrolladas en la investigación. En la Figura 4-5 se muestra la interfaz gráfica GUI de la sección “diseño de bocinas”.

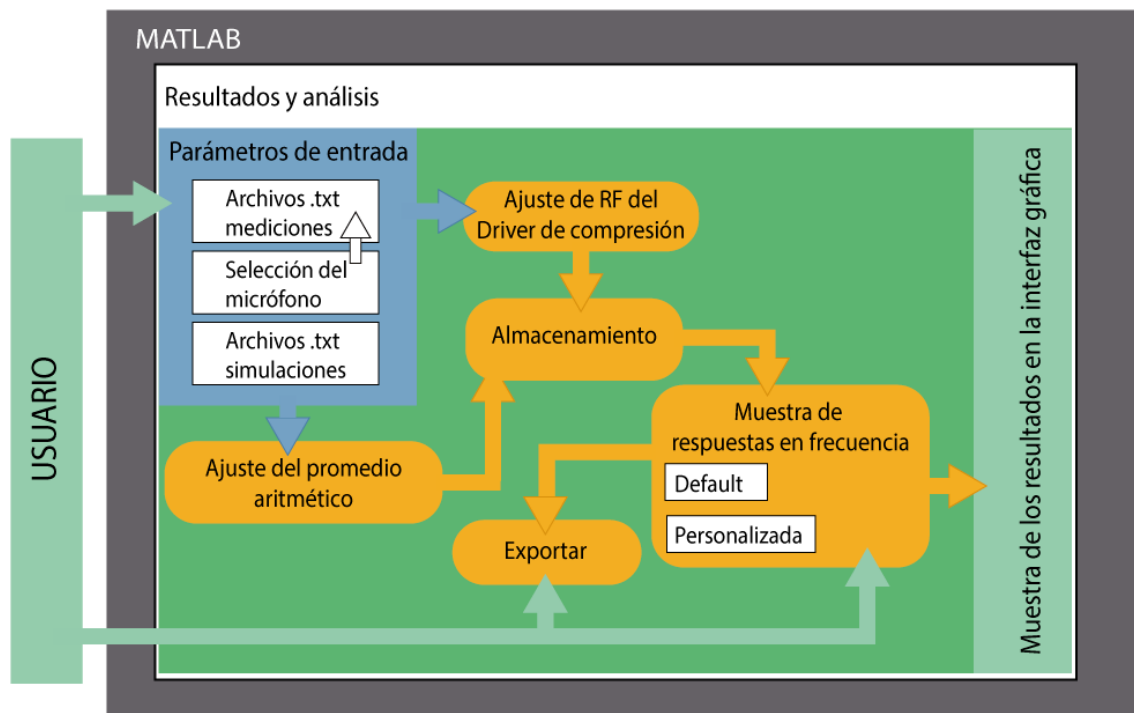
Procesamiento de señal

Las mediciones de la respuesta en frecuencia se efectuaron con el software *Room Eq Wizard*. El programa mencionado se caracteriza por su versatilidad para llevar a cabo mediciones acústicas; brinda opciones para efectuar respuestas al impulso y ecualizaciones. Además, cuenta con un analizador en tiempo y un espectrograma para la muestra de los resultados. No obstante, sus características son limitadas al momento de procesar y analizar los resultados. Este software tiene la

capacidad de almacenar, como máximo, 30 mediciones. Tampoco cuenta con herramientas de cálculo que permitan comparar los resultados. Por estas razones, se decidió adherir, al programa del diseño de bocinas, un código que permitiera almacenar y mostrar todos los resultados de las mediciones de respuesta en frecuencia RF.

En la Figura B-2 se ilustra el funcionamiento de esta sección del programa, por medio de un diagrama de bloques.

Figura B-2: Arquitectura del algoritmo desarrollado para procesar, almacenar y graficar los resultados de las respuestas en frecuencia.



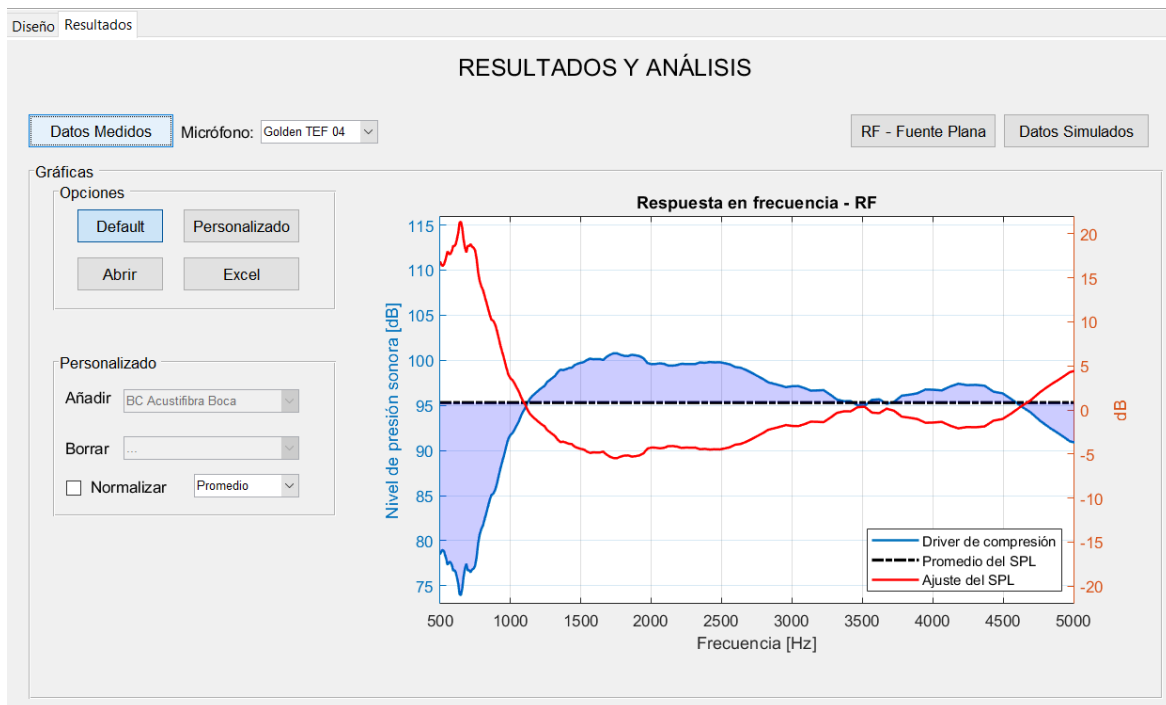
Fuente: propia

En el software de medición REW se pueden exportar las respuestas en frecuencia obtenidas en archivos de texto. El usuario selecciona el micrófono utilizado para las mediciones ingresadas. El programa desarrollado en la investigación tiene la capacidad de leer los caracteres de dichos archivos y convertirlos en variables *double*, con el fin de ser operadas matemáticamente y graficadas en pantalla. Después de seleccionar los archivos de texto, el programa reconoce la respuesta en frecuencia del driver de compresión, y realiza el ajuste aritmético a las demás RF, tal como se

describe en la sección 4.1.2 del documento. Para lo anterior, se desarrolló una función externa, con el nombre *datos_ajustados*, llamada desde el código principal.

La GUI permite que el usuario seleccione dos maneras de visualizar las respuestas en frecuencia. Con la primera, nombrada *default*, se muestra la RF del driver de compresión, su promedio aritmético en decibelios y el ajuste aplicado a las demás respuestas en frecuencia, tal como se ilustra en la Figura B-3

Figura B-3: Ajuste de la RF, respuesta en frecuencia y promedio aritmético del driver de compresión, graficados con la opción *default* del programa desarrollado.

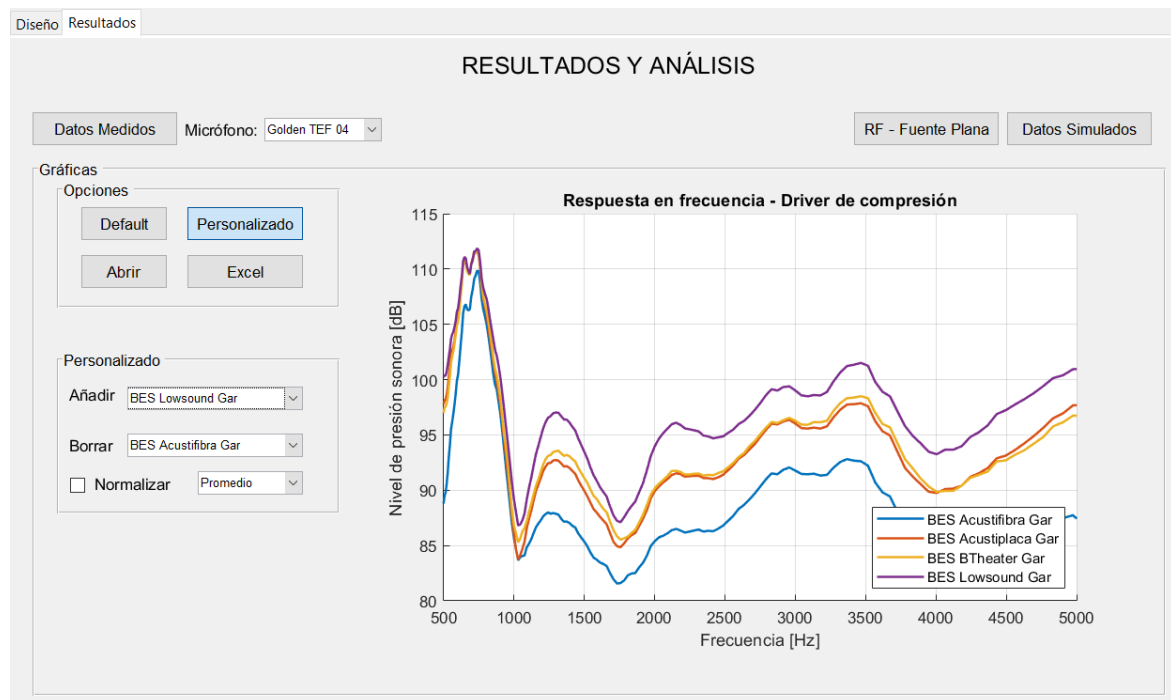


Fuente: propia

Con la opción “personalizado”, el programa muestra en pantalla las respuestas en frecuencia elegidas por medio de los *pop up menu*, nombrados “añadir” y “borrar”. En estos, se encuentran disponibles todas las bocinas, con y sin material absorbente a su interior. Se estableció una cantidad máxima de 6 respuestas en frecuencia para ser graficadas simultáneamente. Con los *pop up menu* mencionados, se garantiza versatilidad en la combinación de la RF ilustradas en pantalla. El usuario puede graficar

simultáneamente las respuestas en frecuencia medidas con cada uno de los micrófonos, así como la RF promediada aritméticamente.

Figura B-4: Resultados mostrados simultáneamente por la interfaz gráfica del usuario.



Fuente: propia

En este programa también se pueden importar las respuestas en frecuencia simuladas en ACTRAN VI. El software de simulación cuenta con la opción de exportar las RF en archivos de texto, que luego serían leídas por MATLAB con la importación. Tanto las RF medidas como las simuladas se almacenan en una matriz, que pueden ser exportadas en un archivo con formato .xsl al oprimir el botón con el nombre EXCEL.

A continuación, se muestra el código del programa:

Gui General

```
%Programación de la
GUI.....
function Gui_General
```

```

%DISEÑO GRÁFICO DE LA INTEFAZ-----
-----
%Creación de la GUI con sus dimensiones-----
-----
fig =
figure('NumberTitle','off','Name','Bocinas','Position',[100,100,10
00,600],'Resize','off','ToolBar','figure','MenuBar','none');

%Personalización de la barra de herramientas-----
-----
tbh = findall(fig,'Type','uitoolbar');

delete([findall(tbh,'ToolTipString','New
Figure'),findall(tbh,'ToolTipString','Open
File'),findall(tbh,'ToolTipString','Print Figure'),...
findall(tbh,'ToolTipString','Edit
Plot'),findall(tbh,'ToolTipString','Brush/Select
Data'),findall(tbh,'ToolTipString','Link Plot'),...
findall(tbh,'ToolTipString','Insert
Colorbar'),findall(tbh,'ToolTipString','Insert
Legend'),findall(tbh,'ToolTipString','Hide Plot Tools'),...
findall(tbh,'ToolTipString','Show Plot Tools and Dock
Figure')]);

%Definición de las pestañas disponibles en la GUI-----
-----
tabgp = uitabgroup('Parent',fig,'Position',[0 0 1 1]);
tab1 = uitab('Parent',tabgp,'Title','Diseño');
tab2 = uitab('Parent',tabgp,'Title','Resultados');

%-----PESTAÑA UNO-----
-----

%Panels-----
-----
pinput =
uipanel('Parent',tab1,'Title','Ingreso','FontSize',10,'Position',[
.02 .63 .2 .3]);
poutput = uipanel('Parent',tab1,'Title','Propiedades
obtenidas','FontSize',10,'Position',[.23 .63 .2 .3]);
pgraphhorn = uipanel('Parent',tab1,'Title','Modelo de la
bocina','FontSize',10,'Position',[.02 .02 .51 .6]);
pgraphimpedance =
uipanel('Parent',tab1,'Title','Gráficas','FontSize',10,'Position',
[.54 .10 .45 .82]);

%Pop up menu-----
-----
poptypeHorn =
uicontrol('Parent',pinput,'Style','popupmenu','String',{'Exponenci

```

```

al', 'Cónica'}, 'Position', [20, 105, 150, 25], 'CallBack', @callpoptypeHorn, 'TooltipString', 'Seleccione el tipo de bocina');

%Edit box
efc =
uicontrol('Parent', pinput, 'Style', 'edit', 'String', '1000', 'CallBack', @callefec, 'Position', [70, 75, 100, 25], 'TooltipString', 'Ingrese la frecuencia de corte en hercios');
edT =
uicontrol('Parent', pinput, 'Style', 'edit', 'String', '0.05', 'CallBack', @calledT, 'Position', [70, 45, 100, 25], 'TooltipString', 'Ingrese el diámetro de la garganta en metros');
exo =
uicontrol('Parent', pinput, 'Style', 'edit', 'String', '0.01', 'CallBack', @callexo, 'Position', [70, 15, 100, 25], 'TooltipString', 'Ingrese la longitud de X1 en metros (Sólo para bocinas cónicas)');
eST =
uicontrol('Parent', poutput, 'Style', 'edit', 'String', '', 'CallBack', @calleST, 'Position', [75, 125, 100, 25], 'TooltipString', 'Área de la garganta ingresada');
eSM =
uicontrol('Parent', poutput, 'Style', 'edit', 'String', '', 'CallBack', @calleSM, 'Position', [75, 95, 100, 25], 'TooltipString', 'Área de la boca calculada');
eL =
uicontrol('Parent', poutput, 'Style', 'edit', 'String', '', 'CallBack', @calleL, 'Position', [75, 65, 100, 25], 'TooltipString', 'Longitud de la bocina calculada');
eM =
uicontrol('Parent', poutput, 'Style', 'edit', 'String', '', 'CallBack', @calleM, 'Position', [75, 35, 100, 25], 'TooltipString', 'Factor de ensanchamiento');
eDM =
uicontrol('Parent', poutput, 'Style', 'edit', 'String', '', 'CallBack', @calleDM, 'Position', [75, 5, 100, 25], 'TooltipString', 'Diámetro de la boca');
eKR =
uicontrol('Parent', tab1, 'Style', 'edit', 'String', '1', 'CallBack', @calleKR, 'Position', [478, 498, 50, 25], 'TooltipString', 'Factor de linealización de impedancia (Keele, 1970)');
eSPL1000Hz =
uicontrol('Parent', tab1, 'Style', 'edit', 'String', '89.9', 'CallBack', @calleSPL1000Hz, 'Position', [638, 30, 50, 25], 'TooltipString', 'Ingrese el SPL medido en la frecuencia de 1000 Hz a un metro de distancia. ');
eVD =
uicontrol('Parent', tab1, 'Style', 'edit', 'String', '', 'CallBack', @calleVD, 'Position', [600, 3, 88, 25], 'TooltipString', 'Velocidad del diafragma del driver de compresión');

```

```

%Slider-----
-----
sldKR = uicontrol('Parent',tab1,'Style','slider','position',[490,
365, 20,
130],'Min',0,'Max',5,'Value',1,'Callback',@callsldKR,'SliderStep',
[0.005 0.10]);

%Axes-----
-----
hahorn =
axes('Parent',pgraphhorn,'Units','pixels','Position',[80,50,380,25
0]);
haimp =
axes('Parent',pgraphimpedance,'Units','pixels','Position',[65,115,
370,300]);

%Checkbox-----
-----
chZSPKR =
uicontrol('Parent',pgraphimpedance,'Style','checkbox','Value',1,'C
allBack',@callchZSPKR,'Position',[55,45,15,15],'TooltipString','Gr
afica de la impedancia del altavoz, con un diámetro equivalente a
dT, sin ser acoplado a una bocina');
chZT =
uicontrol('Parent',pgraphimpedance,'Style','checkbox','Value',1,'C
allBack',@callchZT,'Position',[180,45,15,15],'TooltipString','Graf
ica teórica de la impedancia en la abertura de la garganta, según
las dimensiones establecidas');
chZM =
uicontrol('Parent',pgraphimpedance,'Style','checkbox','Value',1,'C
allBack',@callchZM,'Position',[280,45,15,15],'TooltipString','Graf
ica teórica de la impedancia en la abertura de la boca, según las
dimensiones establecidas');

%Buttons-----
-----
btnExpHorn =
uicontrol('Parent',tab1,'Style','pushbutton','String','Exponencial
','CallBack',@callbtnExpHorn,'Position',[775,17,100,25],'TooltipSt
ring','Propiedades por defecto de la bocina exponencial con perfil
de área circular y rectangular en estudio');
btnConHorn =
uicontrol('Parent',tab1,'Style','pushbutton','String','Cónica','Ca
llBack',@callbtnConHorn,'Position',[885,17,100,25],'TooltipString'
,'Propiedades por defecto de la bocina cónica en estudio');
btnOpenFig =
uicontrol('Parent',pgraphimpedance,'Style','pushbutton','String','
Abrir','CallBack',@callbtnOpenFig,'Position',[370,45,60,25],'Toolt
ipString','Clic para abrir una ventana externa que ilustra la
gráfica de la impedancia');

```

```

btnUpdateGraph =
uicontrol('Parent',pgraphimpedance,'Style','pushbutton','String','
Actualizar','Callback',@callbtnUpdateGraph,'Position',[180,7,100,2
5],'TooltipString','Clic para visualizar la impedancia según la
bocina establecida');

%Text-----
-----
annotation(tab1,'textbox',[0.40,0.89,0.1,0.1],'string','DISEÑO DE
BOCINAS','FontSize',15,'FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(pinput,'textbox',[0.02,1,0,0],'string','Tipo de
bocina','FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(pinput,'textbox',[0.02,0.65,0,0],'string','$f_{c}$ [Hz]
=$','$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(pinput,'textbox',[0.02,0.45,0,0],'string','$d_{T}$ [m]
=$','$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(pinput,'textbox',[0.02,0.25,0,0],'string','$x_{1}$ [m]
=$','$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');

annotation(poutput,'textbox',[0.02,0.97,0,0],'string','$S_{T}$
[m^{2}]
=$','$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(poutput,'textbox',[0.02,0.77,0,0],'string','$S_{M}$
[m^{2}]
=$','$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(poutput,'textbox',[0.02,0.57,0,0],'string','$l$ [m]
=$','$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(poutput,'textbox',[0.02,0.37,0,0],'string','$m$
=$','$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(poutput,'textbox',[0.02,0.17,0,0],'string','$d_{M}$ [m]
=$','$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');

annotation(tab1,'textbox',[0.436,0.815,0.1,0.1],'string','$ka_{m}:$
$', '$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none','F
ontSize',11);
annotation(tab1,'textbox',[0.465,0.77,0.1,0.1],'string','$5$', 'int
erpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none','FontSize
',11);
annotation(tab1,'textbox',[0.465,0.57,0.1,0.1],'string','$0$', 'int
erpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none','FontSize
',11);
annotation(pgraphimpedance,'textbox',[0.15,0.14,0,0],'string','$Z_{
SPKR}$
[Ohm]$', '$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','non
e');
annotation(pgraphimpedance,'textbox',[0.43,0.14,0,0],'string','$Z_{
T}$
[Ohm]$', '$','interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','non
e');

```

```

annotation(pgraphimpedance,'textbox',[0.65,0.14,0,0],'string','$Z_{M}$',
'interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(tab1,'textbox',[0.69,0.065,0,0],'string','PRESETS','int
erpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none','FontSize
',11);
annotation(tab1,'textbox',[0.53,0.095,0,0],'string','$SPL_{1000Hz}$',
'interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','none
','FontSize',11);
annotation(tab1,'textbox',[0.53,0.05,0,0],'string','$v_{d}$',
'interpreter','latex','FitBoxToText','on','LineStyle','non
e','FontSize',11);

%-----PESTAÑA DOS-----
%Panels-----
pgraphresponse =
uipanel('Parent',tab2,'Title','Gráficas','FontSize',10,'Position',
[.02 .02 .97 .80]);
pmanage=
uipanel('Parent',pgraphresponse,'Title','Personalizado','FontSize'
,10,'Position',[.02 .35 .25 .32]);
poptions=
uipanel('Parent',pgraphresponse,'Title','Opciones','FontSize',10,'
Position',[.02 .75 .25 .25]);

%Axes-----
haresponse =
axes('Parent',pgraphresponse,'Units','pixels','Position',[350,80,5
40,330]);

%Toggles-----
btnggr = uibuttongroup('Parent',poptions,'Position',[0 0.5 1
0.5],'SelectionChangedFcn',@callbtnggr,'BorderType','none');
btndefault =
uicontrol(btnggr,'Style','togglebutton','String','Default','FontSi
ze',10,'Position',[20 10 75 30],'TooltipString','Pulse para ver la
respuesta en frecuencia del driver de compresión y el ajuste
establecido');
btnpersonalizado =
uicontrol(btnggr,'Style','togglebutton','String','Personalizado','
FontSize',10,'Position',[110 10 100 30],'TooltipString','Pulse
para ver la respuesta en frecuencia de las bocinas, con y sin
material absorbente');

```



```

%Buttons-----
-----
btnOpenFigRF =
uicontrol(poptions,'Style','pushbutton','String','Abrir','FontSize',
',10','Position',[20 15 75 30],'TooltipString','Pulse para ver la
gráfica en una ventana externa','Callback',@callbtnOpenFigRF);
btnIngresar = uicontrol(tab2,'Style','pushbutton','String','Datos
Medidos','FontSize',10,'Position',[20 480 125
30],'TooltipString','Pulse para ingresar los datos medidos en
formato .txt','CallBack',@callbtnIngresar);
btnSimulatedData =
uicontrol(tab2,'Style','pushbutton','String','Datos
Simulados','FontSize',10,'Position',[850 480 125
30],'TooltipString','Pulse para ingresar los datos simulados en
formato .txt','CallBack',@callbtnIngresarDatosSimulados);
btnAdjustSimulatedData =
uicontrol(tab2,'Style','pushbutton','String','RF - Fuente
Plana','FontSize',10,'Position',[720 480 125
30],'TooltipString','Pulse para ingresar la respuesta en
frecuencia simulada de la fuente plana en formato
.txt','CallBack',@callbtnAdjustSimulatedData);
btnExporttoExcel =
uicontrol(poptions,'Style','pushbutton','String','Excel','FontSize',
',10','Position',[110 15 100 30],'TooltipString','Pulse para
exportar las RF graficadas a un archivo de
Excel','CallBack',@callbtnExporttoExcel);

%Checkbox-----
-----
checkAdjust =
uicontrol('Parent',pmanage,'Style','checkbox','Value',0,'Position',
,[10 15 15 15],'TooltipString','Pulse para normalizar los
datos','CallBack',@callcheckAdjust);

%Pop up menu-----
-----
popMicrophoneSelected =
uicontrol('Parent',tab2,'Style','popupmenu','String',{'Gold Line
TEF 04';'Behringer
ECM8000';'Crown'},'Position',[218,480,100,25],'CallBack',@callpopM
icrophoneSelected,'TooltipString','Seleccione el micrófono con el
que realizó las mediciones','Enable','on');
popAddMaterial =
uicontrol('Parent',pmanage,'Style','popupmenu','String',{'...'},'P
osition',[60,82,150,25],'CallBack',@callpopAddMaterial,'TooltipStr
ing','Añada resultados a la gráfica','Enable','off');
popHideMaterial =
uicontrol('Parent',pmanage,'Style','popupmenu','String',{'...'},'P

```

```

osition',[60,42,150,25],'Callback',@callpopHideMaterial,'TooltipString','Borre resultados de la gráfica','Enable','off');
popMicrophoneSelShowData =
uicontrol('Parent',pmanage,'Style','popupmenu','String',{'...'},'Position',[120,27,90,8],'Callback',@callpopMicrophoneSelShowData,'TooltipString','Seleccione un micrófono para graficar las mediciones obtenidas con el mismo','Enable','off');

%Text-----
-----
annotation(tab2,'textbox',[0.38,0.89,0.1,0.1],'string','RESULTADOS Y ANÁLISIS','FontSize',15,'FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(tab2,'textbox',[0.143,0.785,0.1,0.1],'string','Micrófono:','FontSize',10,'FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(pmanage,'textbox',[0.01,0.93,0,0],'string','Añadir','FontSize',10,'FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(pmanage,'textbox',[0.01,0.57,0,0],'string','Borrar','FontSize',10,'FitBoxToText','on','LineStyle','none');
annotation(pmanage,'textbox',[0.10,0.3,0,0],'string','Normalizar','FontSize',10,'FitBoxToText','on','LineStyle','none');

%-----PROGRAMACIÓN PESTAÑA UNO-----
-----
%Primer estado de las variables-----
-----
kr = 1; typeHorn = 1; fc = 1000; dT = 0.05; xo = 0.01; f = 20:1:20000;
dM = 1; m = 1; l = 1; Zspkr = 1; ZT = 1; ZM = 1; checkZspkr = 1; checkZT = 1; checkZM = 1; SPL1000Hz = 92.47;

Modelo_Bocinas();
Calculo_Impedancias();

%Funciones-----
-----
function callpoptypeHorn(source, eventdata)
    typeHorn = get(source,'Value');
    Modelo_Bocinas(); end

function callefc(source,eventdata)
    fc = str2double(get(source,'String'));
    Modelo_Bocinas(); end

function calledT(source,eventdata)
    dT = str2double(get(source,'String'));
    Modelo_Bocinas(); end

function callexo(source,eventdata)
    xo = str2double(get(source,'String'));

```

```

        Modelo_Bocinas(); end

function callsldKR(source, eventdata)
    kr = source.Value;
    set(eKR, 'string', num2str(kr));
    Modelo_Bocinas(); end

function calleKR(source, eventdata)
    kr = str2double(get(source, 'String'));
    set(sldKR, 'Value', kr);
    Modelo_Bocinas(); end

function Modelo_Bocinas()
    [m, dM, SM, ST, l, Dx] = Dimension_Bocinas (fc, typeHorn,
dT, kr, xo);
    [Z,Y,X] = cylinder(Dx);
    Z = Z + max(Dx);
    Y = Y + max(Dx);
    X = X * l;
    axes(hahorn);
    surf(X,Y,Z,'EdgeColor','flat');
    zlabel('alto (m)'); ylabel('ancho (m)'); xlabel('largo
(m) ');
    set(eM,'string',num2str(m));
    set(eDM,'string',num2str(dM));
    set(eSM,'string',num2str(SM));
    set(eST,'string',num2str(ST));
    set(eL,'string',num2str(l));
end

function callbtnUpdateGraph(source, eventdata)
    Calculo_Impedancias()
end

function Calculo_Impedancias()
    [Zspkr, ZT, ZM] = Calcular_Impedancias(typeHorn, dT, dM,
m, l, xo, fc);
    axes(haimp);
    Mostrar_Graficas(); end

function callchZSPKR(source, eventdata)
    checkZspkr = get(source, 'Value'); axes(haimp);
    Mostrar_Graficas();
end

function callchZT(source, eventdata)
    checkZT = get(source, 'Value'); axes(haimp);
    Mostrar_Graficas();
end

```

```

function callchZM(source, eventdata)
    checkZM = get(source, 'Value'); axes(haimp);
    Mostrar_Graficas();
end

function Mostrar_Graficas()
    if(checkZspkr || checkZT || checkZM ~= 0)
        if(checkZspkr == 1)
            semilogx(f, real(Zspkr), 'b'); hold on
            semilogx(f, imag(Zspkr), 'r');
            legendmat = {'R_{SPKR} - (Altavoz)', 'X_{SPKR} -
(Altavoz)'};
        end
        if(checkZT == 1)
            semilogx(f, real(ZT), 'k');
            if(checkZspkr == 0)
                hold on
                legendmat = {'R_{T} - (Garganta)', 'X_{T} -
(Garganta)'};
            else legendmat = [legendmat, {'R_{T} -
(Garganta)', 'X_{T} - (Garganta)'}]; end
            semilogx(f, imag(ZT), 'g');
        end
        if(checkZM == 1)
            semilogx(f, real(ZM), 'm');
            if(checkZspkr == 0 && checkZT == 0)
                hold on
                legendmat = {'R_{M} - (Boca)', 'X_{M} -
(Boca)'};
            else legendmat = [legendmat, {'R_{B} -
(Boca)', 'X_{B} - (Boca)'}]; end
            semilogx(f, imag(ZM), 'c');
        end
        hold off
        xlim([20 20000])
        grid on
        title('Impedancia acústica de radiación - Z_{a}')
        ylabel('Z * (S/\rho c)')
        xlabel('Frecuencia (Hz)')
        lgd = legend(legendmat, 'Location', 'northwest');
        title(lgd, 'Resistencia R y Reactancia X')
    end
end

function callbtnExpHorn(source, eventdata)
    set(efc, 'string', '300'); set(edT, 'string', '0.05');
    set(exo, 'string', '0.01'); set(eKR, 'string', '0.278');
    set(sldKR, 'value', 0.278); set(poptypeHorn, 'value', 1);
    kr = 0.278; typeHorn = 1; fc = 300; dT = 0.05; xo = 0.01;
    Modelo_Bocinas();
end

```

```

        Calculo_Impedancias();
    end

    function callbtnConHorn(source, eventdata)
        set(efc, 'string','1000'); set(edT, 'string','0.05');
        set(exo, 'string','0.075'); set(eKR, 'string','0.85');
        set(sldKR, 'value',0.85); set(poptypeHorn, 'value',2);
        kr = 0.85; typeHorn = 2; fc = 1000; dT = 0.05; xo = 0.075;
        Modelo_Bocinas();
        Calculo_Impedancias();
    end

    function callbtnOpenFig(source, eventdata)
        figure('NumberTitle','off','Name','Gráfica de la
        impedancia acústica')
        Mostrar_Graficas();
    end

    function calleM(source, eventdata) end

    function calleDM(source, eventdata) end

    function calleSM(source, eventdata) end

    function calleST(source, eventdata) end

    function calleL(source, eventdata) end

%-----PESTAÑA DOS-----
-----
Data = 0; Title = ''; TitleM = ''; contAddMaterial = 0;
NumMaterialAdded(1,1) = 0; MaterialAdded(1,1) = {' '};
NumMaterialAddedTwo(1,1) = 0; average = 0; adjust = 0;
MicrophoneSelected = ''; DataTitleDif{1,1} = 'Materiales'; DataDif
= {0}; contDiferences = 2;
DataSD = 0; DataMean = 0; MaximumData = 0; MinimumData = 0;
ReductionMean = 0; MaximumReduction = 0; FrecsMaxReduction = 0;
choosedOptionGraph = 1; Var = 0; DatatoZero = 0; DatatoGraph = 2;
checkAdjust = 0; numMicrophoneSelected = 1; DataTotal = {0};
contMicrophoneInserted = 1; numMicrophoneSelShowData = 1;
numMicrophoneSelHandleData = 1; orderDataTable = 1;
strMicrophoneSelected = {'Gold Line TEF-04';'Behringer
ECM8000';'Crown CM-150'}; DataVelocityPlanarSource = 0; DataAdjust
= 0;
format long
    function callbtnIngresar(source, eventdata)
        [FileName, PathName] = uigetfile({'*.txt','Archivo de
        texto (*.txt)'},'Seleccione el archivo con los datos de las
        mediciones','MultiSelect','on');
        if(isa(FileName,'double') && isa(PathName,'double'))

```

```

        return
    end
    [Title,Data] = Datos_Medidos(FileName,PathName);
    DataTotal{contMicrophoneInserted,14} = Data;
    TitleM = Title;
    tamano = size(Title);
    for i = 2:tamano(1,2)
        Title(1,i) = {[Title{1,i}, '
',strMicrophoneSelected{numMicrophoneSelected}]];
    end
    MicrophoneSelected{contMicrophoneInserted,1} =
    strMicrophoneSelected{numMicrophoneSelected};
    [Data, average, adjust, MaximumData, MinimumData,
    DataMean, DataSD, ReductionMean, MaximumReduction,
    FrecsMaxReduction, Var, DatatoZero] = Datos_Ajustados(Data);
    DataTotal(contMicrophoneInserted,1) = {Title};
    DataTotal(contMicrophoneInserted,2) = {Data};
    DataTotal{contMicrophoneInserted,3} =
    average;DataTotal{contMicrophoneInserted,4} =
    adjust;DataTotal{contMicrophoneInserted,5} =
    MaximumData;DataTotal{contMicrophoneInserted,6} =
    MinimumData;DataTotal{contMicrophoneInserted,7} =
    DataMean;DataTotal{contMicrophoneInserted,8} =
    DataSD;DataTotal{contMicrophoneInserted,9} =
    ReductionMean;DataTotal{contMicrophoneInserted,10} =
    MaximumReduction;DataTotal{contMicrophoneInserted,11} =
    FrecsMaxReduction;DataTotal{contMicrophoneInserted,12} =
    Var;DataTotal{contMicrophoneInserted,13} = DatatoZero;
    contMicrophoneInserted = contMicrophoneInserted + 1;
    MeanMeasurements()
    Graph_Default();
end

function MeanMeasurements()
    DataCalMean = 0;
    for i = 1:contMicrophoneInserted-1
        DataCalMean = DataCalMean +
    10.^(double(DataTotal{i,14}(:,2:end))/20)*(20*10^(-6));
    end
    DataCalMean = DataCalMean/i;
    DataCalMean = 20*log10(DataCalMean./(20*10^(-6)));
    DataCalMean = [Data(:,1),DataCalMean];
    [Data, average, adjust, MaximumData, MinimumData,
    DataMean, DataSD, ReductionMean, MaximumReduction,
    FrecsMaxReduction, Var, DatatoZero] =
    Datos_Ajustados(DataCalMean);
    DataTotal(contMicrophoneInserted,1) = {TitleM};
    DataTotal(contMicrophoneInserted,2) = {Data};
    DataTotal{contMicrophoneInserted,3} =
    average;DataTotal{contMicrophoneInserted,4} =

```

```

adjust;DataTotal{contMicrophoneInserted,5} =
MaximumData;DataTotal{contMicrophoneInserted,6} =
MinimumData;DataTotal{contMicrophoneInserted,7} =
DataMean;DataTotal{contMicrophoneInserted,8} =
DataSD;DataTotal{contMicrophoneInserted,9} =
ReductionMean;DataTotal{contMicrophoneInserted,10} =
MaximumReduction;DataTotal{contMicrophoneInserted,11} =
FreecsMaxReduction;DataTotal{contMicrophoneInserted,12} =
Var;DataTotal{contMicrophoneInserted,13} = DatatoZero;
    MicrophoneSelected{contMicrophoneInserted,1} = 'Promedio';
    numMicrophoneSelShowData = contMicrophoneInserted;
numMicrophoneSelHandleData = contMicrophoneInserted;

set(popAddMaterial,'string',transpose(DataTotal{contMicrophoneInse
rted,1}(1,2:end))); set(popMicrophoneSelShowData,'enable','on');
set(popMicrophoneSelShowData,'string',MicrophoneSelected);
set(popMicrophoneSelShowData,'value',contMicrophoneInserted);
    if(contMicrophoneInserted >= 3)
        Differences_Calculated();
    end
end

function Differences_Calculated()
    for i = 1:contMicrophoneInserted-2
        DataTitleDif{1,contDiferences} =
[MicrophoneSelected{i,1},' - ',MicrophoneSelected{end-1,1}];
        if(contDiferences == 2)
            DataDif =
transpose(max(abs(double(DataTotal{i,2}(:,2:end)) -
double(DataTotal{end-1,2}(:,2:end))));
        else
            DataDif = [DataDif,
transpose(max(abs(double(DataTotal{i,2}(:,2:end)) -
double(DataTotal{end-1,2}(:,2:end)))))];
        end
        contDiferences = contDiferences + 1;
    end
end

function Graph_Default()
    cla(haresponse,'reset'); axes(haresponse);
    Same_Code_Graph_Default()
end

function Same_Code_Graph_Default()
    set(popHideMaterial,'Enable','off');
set(popAddMaterial,'Enable','off')
yyaxis left

```

```

        p1 =
plot(Data(:,1),double(DataTotal{numMicrophoneSelShowData,2}(:,end)
),'LineWidth', 1.5);
        ylim([73 116])
        hold on
        p2 = line('XData', [500 5000], 'YData',
[double(DataTotal{numMicrophoneSelShowData,3}(1,1))
double(DataTotal{numMicrophoneSelShowData,3}(1,1))], 'LineStyle',
'-.','LineWidth', 2, 'Color','k');

fill([Data(1,1);Data(:,1);Data(end,1)], [double(DataTotal{numMicrop
honeSelShowData,3}(1,1));double(DataTotal{numMicrophoneSelShowData
,2}(:,end));double(DataTotal{numMicrophoneSelShowData,3}(1,1))], 'b
','EdgeColor','none','FaceAlpha', 0.2);
        yyaxis right
        p3 =
plot(Data(:,1),double(DataTotal{numMicrophoneSelShowData,4}(:,end)
)*-1,'r','LineWidth',1.5);
        legendmat =
[DataTotal{numMicrophoneSelShowData,1}{1,end}{'Promedio del
SPL'};'Ajuste del SPL'];
        p = [p1 p2 p3];
        xlim([500 5000])
        ylim([-22 22])
        grid on
        yyaxis left
        title('Respuesta en frecuencia - RF')
        ylabel('Nivel de presión sonora [dB]')
        xlabel('Frecuencia [Hz]')
        if ischar(p) legend('show','Location','southeast')
        else legend(p,legendmat,'Location','southeast'); end
        yyaxis right
        ylabel('dB')
    end

function Same_Code_Graph(legendmat,p)
    xlim([500 5000])
    grid on
    title('Respuesta en frecuencia - Driver de compresión')
    if (checkAdjust == 0) ylabel('Nivel de presión sonora
[dB]')
    else ylabel('dB')
    end
    xlabel('Frecuencia [Hz]')
    if ischar(p) legend('show','Location','southeast')
    else legend(p,legendmat,'Location','southeast'); end
end

function callpopAddMaterial(source, eventdata)
    if(contAddMaterial < 6)

```



```

        contAddMaterial = contAddMaterial + 1;
        NumMaterialAdded(contAddMaterial,1) =
get(source, 'Value')+1;
        NumMaterialAddedTwo(contAddMaterial,1) =
numMicrophoneSelShowData;
        MaterialAdded(contAddMaterial,1) =
DataTotal{NumMaterialAddedTwo(contAddMaterial,1),1}(1,NumMaterialA
dded(contAddMaterial,1));
        set(popHideMaterial, 'string', MaterialAdded)
        Graph_Per(1,0);
    end
end

function callpopHideMaterial(source, eventdata)
    num = get(source, 'Value');
    if(contAddMaterial > 1)
        contAddMaterial = contAddMaterial - 1;
        NumMaterialAdded(num) = [];
        MaterialAdded(num) = [];
        NumMaterialAddedTwo(num) = [];
        Graph_Per(2,num);
    elseif(contAddMaterial == 1)
        contAddMaterial = 0;
        NumMaterialAdded(num) = [];
        MaterialAdded(num) = {'...'};
        NumMaterialAddedTwo(num) = [];
        Graph_Per(2,num);
    end
end

function Graph_Per(option,hide)
    axes(haresponse); Same_Code_Graph_Per(option,hide)
end

function Same_Code_Graph_Per(option,hide)
    if (option == 1)
        if(contAddMaterial == 1) cla(haresponse, 'reset'); hold
on; end

    plot(Data(:,1),double(DataTotal{NumMaterialAddedTwo(contAddMateria
l,1),DatatoGraph}(:,NumMaterialAdded(contAddMaterial,1))), 'LineWid
th',
1.5, 'DisplayName', [DataTotal{NumMaterialAddedTwo(contAddMaterial,1
),1}{1,NumMaterialAdded(contAddMaterial,1)}}]);
        elseif (option == 2)
            h = findobj(haresponse, 'type', 'line');
            if(contAddMaterial>=2) delete(h((contAddMaterial -
hide)+2));
            elseif (contAddMaterial==1)
                if(hide == 1) delete(h(2)); else delete(h(1)); end

```

```

        else delete(h(1));
        end
    else
        hold on;
        for i = 1:contAddMaterial

plot(Data(:,1),double(DataTotal{NumMaterialAddedTwo(i,1),DatatoGra
ph}(:,NumMaterialAdded(i,1))), 'LineWidth',
1.5, 'DisplayName', [DataTotal{NumMaterialAddedTwo(i,1),1}{1,NumMate
rialAdded(i,1)}]);
        end
    end
    set(popHideMaterial, 'value', 1);
set(popHideMaterial, 'string', MaterialAdded);
    Same_Code_Graph(' ', ' ')
end

function callbtnggr(source, event)
    cla(haresponse, 'reset')
    if(strcmp(event.NewValue.String, 'Default'))
        Graph_Default(); choosedOptionGraph = 1;
    else
        set(popHideMaterial, 'Enable', 'on');
set(popAddMaterial, 'Enable', 'on');
        if(contAddMaterial>0) Graph_Per(3,0); end
        choosedOptionGraph = 2;
    end
end

function callbtnOpenFigRF(source, event)
    figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Respuesta en
frecuencia')
    if (choosedOptionGraph == 1) Same_Code_Graph_Default()
    else Same_Code_Graph_Per(3,0); end
end

function callcheckAdjust(source, event)
    checkAdjust = get(source, 'Value');
    if (checkAdjust == 0)
        DatatoGraph = 2;
    else
        DatatoGraph = 13;
    end
    cla(haresponse, 'reset'); Graph_Per(3,0);
end

function calleSPL1000Hz(source, eventdata)
    SPL1000Hz = str2double(get(source, 'String'));
    vd = diafragm_velocity(SPL1000Hz);
    set(eVD, 'string', num2str(vd)); end

```

```

function callpopMicrophoneSelected(source, eventdata)
    numMicrophoneSelected = get(source, 'Value');
end

function callpopMicrophoneSelShowData(source, eventdata)
    numMicrophoneSelShowData = get(source, 'Value');

set(popAddMaterial, 'string', transpose(DataTotal{numMicrophoneSelShowData, 1}(1, 2:end)))
    if(chosedOptionGraph == 1)
        cla(haresponse, 'reset')
        Graph_Default();
    end
end

function callbtnIngresarDatosSimulados(source, eventdata)
    [FileName, PathName] = uigetfile({'*.txt', 'Archivo de texto (*.txt)'}, 'Seleccione el archivo con los datos de las mediciones', 'MultiSelect', 'on');
    if(isa(FileName, 'double') && isa(PathName, 'double'))
        return
    end
    [TitleSim, DataSim, ZeroData] = SimulatedData(FileName, PathName, DataTotal{1, 2}(:, 1), DataAdjust);
    for i = 1:contMicrophoneInserted
        DataTotal{i, 1}{1, end+1} = TitleSim;
        DataTotal{i, 2}(:, end+1) = DataSim; DataTotal{i, 5}(1, end+1) = 0; DataTotal{i, 6}(1, end+1) = 0; DataTotal{i, 7}(1, end+1) = 0; DataTotal{i, 8}(1, end+1) = 0; DataTotal{i, 9}(1, end+1) = 0; DataTotal{i, 10}(1, end+1) = 0; DataTotal{i, 12}(1, end+1) = 0; DataTotal{i, 13}(:, end+1) = ZeroData;
    end

set(popAddMaterial, 'string', transpose(DataTotal{contMicrophoneInserted, 1}(1, 2:end))); set(popHandleData, 'enable', 'on');
set(popMicrophoneSelShowData, 'enable', 'on');
set(popMicrophoneSelShowData, 'string', MicrophoneSelected);
set(popMicrophoneSelShowData, 'value', contMicrophoneInserted);
set(popMicrophoneSelHandleData, 'string', MicrophoneSelected);
set(popMicrophoneSelHandleData, 'value', contMicrophoneInserted);
set(popMicrophoneSelHandleData, 'enable', 'on');
end

function callbtnAdjustSimulatedData(source, eventdata)
    [FileName, PathName] = uigetfile({'*.txt', 'Archivo de texto (*.txt)'}, 'Seleccione el archivo con los datos de las mediciones', 'MultiSelect', 'on');
    if(isa(FileName, 'double') && isa(PathName, 'double'))
        return
    end

```

```

        end
        [Text, DataVelocityPlanarSource, DataAdjust] =
Adjust_Simulated_Data (FileName, PathName, DataTotal{1,2}(:,1));
    end

    function callbtnExporttoExcel(source, eventdata)
        DataExported = Data(:,1);
        for i = 1:contAddMaterial
            DataExported =
[DataExported, double(DataTotal{NumMaterialAddedTwo(i,1), DatatoGrap
h}(:, NumMaterialAdded(i,1)))]];
        end
        xlswrite('DatosExportados', DataExported, 1)
    end
end
end

```

Dimensión_bocinas.m

```

function [m, dM, SM, ST, l, Dx] = Dimension_Bocinas (fc, typeHorn,
dT, kr, xo)
c = 343;
dM = (c / (pi*fc)) * (kr);
SM = pi*((dM/2)^2);
ST = pi*((dT/2)^2);
    if (typeHorn == 1)%Cálculo para la bocina exponencial-----
    -----
        m = (4*pi*fc)/c;
        l = (1/m)*log((SM/ST));
        lvec = 0:0.001:l;
        Dx = sqrt((ST*exp(m*lvec))/pi);
    elseif (typeHorn == 2)%Cálculo para la bocina cónica-----
    -----
        m = 0;
        %x < xo -----
    -----
        lvec = 0:0.001:xo;
        Dx(1:length(lvec)) = dT/2;
        l = (xo)*sqrt((SM/ST));
        %x > xo -----
    -----
        lvec = xo:0.001:l;
        Dx = [Dx(1:end-1), sqrt((ST*(lvec/xo).^2)/pi)];
    end
end

```

Calcular_impedancias.m

```

function [Zspkr, ZT, ZM] = Calcular_Impedancias(typeHorn, dT, dM,
m, l, xo, fc)
f = 20:1:20000; c = 343; ro = 1.44;

```

```

k = ((2*pi*f)./c);
[Zaspr, Zspr] = Impedancia_piston_plano(dT/2);
[ZaM, ZM] = Impedancia_piston_plano(dM/2);
    %Bocina
exponencial.....
    if(typeHorn == 1)
        b = (1/2)*sqrt((4*(k.^2))-(m^2));
        %f <
fc.....
        Theta = atan(m./(2*1i.*imag(b(1:(round(fc)-20)))));
        %f >
fc.....
        Theta = [Theta,atan(m./(2.*b((round(fc)-19):end)))] ;
        ZT =
        (((ZaM.*cos((b.*1)+Theta)))+(1i*sin(b.*1)))./((cos((b.*1)-
        Theta)))+(1i*ZaM.*sin(b.*1))));
        %f ==
fc.....
        if(mod(fc,1) == 0)
            ZCero = (((1-
            (m*1/2)+(1i*((1*m/2)))/((1i*(1*m/2)+((1+(m*1/2)))))));
            if((fc-19) == 1)
                ZT = [ZCero,ZT((fc+1):end)];
            else
                ZT = [ZT(1:fc-20),ZCero,ZT((fc-18):end)];
            end
        end
    %Bocina
cónica.....
    elseif (typeHorn == 2)
        x2 = 1 - xo;
        kTheta1 = atan(k.*xo);
        kTheta2 = atan(k.*x2);
        ZT = ((1i*(ZaM.*((sin((k*1)-
        kTheta2))./(sin(kTheta2)))+(sin(k*1)))./((ZaM.*(sin((k*1)+(kTh
        eta1)-(kTheta2)))./(sin(kTheta1).*sin(kTheta2)))-
        (1i*((sin((k*1)+(kTheta1))./(sin(kTheta1)))))));
        end

    function [Za, Zm] = Impedancia_piston_plano(a)
        Za = ((pi*(a^2))/(ro*c))*(((ro*c)/(pi*(a^2)))*(1-
        ((besselj(1,2*k.*a))./(k.*a)))+(1i*((2*pi*f.*ro)/(2*pi*(a^4)*(k.
        ^3))).*(StruveH1(round(2*k.*a)))));
        Zm = (((1-
        ((besselj(1,2*k.*a))./(k.*a)))+(1i*((StruveH1(round(2*k.*a,4))./(
        k.*a)))));
        end
end

```

Datos_medidos.m

```

function [Title,Data] = Datos_Medidos (FileName,PathName)
for i = 1:length(FileName)
    if(ischar(FileName))
        fileID = fopen([PathName,FileName]);
    else
        fileID = fopen([PathName,FileName{1,i}]);
    end
    C = textscan(fileID,'%f %f %f');
    fclose(fileID);
    celldisp(C);
    if(i==1) Data = [C{:,1}(8:168),C{:,2}(8:168)];
    else Data = [Data,C{:,2}(8:168)]; end
    if (ischar(FileName)) break; end
end
cleantxt = size(FileName);
if(ischar(FileName))
    FileName = FileName(1:end-4);
    Title = {'f(Hz) ',FileName};
else
    for i = 1:cleantxt(1,2)
        FileName{1,i} = FileName{1,i}(1:end-4);
    end
    Title = ['f(Hz) ',FileName];
end
clc;
end

```

Datos_ajustados.m

```

function [DataOut, average, adjust, MaximumData, MinimumData,
DataMean, DataSD, ReductionMean, MaximumReduction,
FreqsMaxReduction, Var, DatatoZero] = Datos_Ajustados(DataIn)
DataInDRC = 10.^(DataIn(:,end)/20)*(20*10^(-6));
average = mean(DataInDRC);
average = 20*log10(average/(20*10^(-6)));
adjust = DataIn(:,end) - average;
DataOut = DataIn(:,2:end-1) - adjust;
DataOut = [DataIn(:,1),DataOut,DataIn(:,end)];
DataMean = mean(DataOut);
DataSD = std(DataOut);
MaximumData = max(DataOut);
MinimumData = min(DataOut);
DatatoZero = DataOut - DataMean;
Var = max(abs(DatatoZero));
DatatoZero = [DataIn(:,1),DatatoZero(:,2:end)];

```

```

%Cambiar-----
-----

```

```

ReductionMean(1,2:13) = DataMean(1,38) - DataMean(1,2:13);
ReductionMean(1,14:25) = DataMean(1,40) - DataMean(1,14:25);
ReductionMean(1,26:37) = DataMean(1,39) - DataMean(1,26:37);
ReductionMean(1,1) = 0; ReductionMean(1,38:40) = 0;
ReductionMean(1,41) = 0;

Reduction(:,2:13) = DataOut(:,38) - DataOut(:,2:13);
Reduction(:,14:25) = DataOut(:,40) - DataOut(:,14:25);
Reduction(:,26:37) = DataOut(:,39) - DataOut(:,26:37);
Reduction(:,1) = 0; Reduction(:,38:40) = 0; Reduction(:,41) = 0;

[MaximumReduction, Frecs]= max(Reduction);
FrecsMaxReduction = DataOut(Frecs,1);
FrecsMaxReduction(1,1) = 0; FrecsMaxReduction(38:40,1) = 0;
FrecsMaxReduction(41,1) = 0;
end

```

SimulatedData.m

```

function [Title,DataSim,DatatoZero] = Simulated_Data
    (FileName,PathName,Data,DataAdjust)
Title = FileName(1:end-4);
fileID = fopen([PathName,FileName]);
C = textscan(fileID,'%f %f %f');
fclose(fileID);
celldisp(C);
VarTemp1 = 1000000000;
VarTemp2 = 0;
cont1 = 1;
cont2 = 1;
bool = 0;
while(cont1 < length(Data))
    VarTemp2 = abs(Data(cont1,1)-C{1,1}(cont2,1));
    if((VarTemp2 < VarTemp1))
        bool = 1;
        cont2 = cont2 + 1;
        VarTemp1 = VarTemp2;
    elseif((VarTemp2 > VarTemp1) && bool == 1)
        cont2 = cont2 - 1;
        DataSim(cont1,1) = C{1,2}(cont2,1);
        cont1 = cont1 + 1;
        bool = 0;
    elseif ((VarTemp2 > VarTemp1) && bool == 0)
        cont2 = cont2 + 1;
        VarTemp1 = VarTemp2;
    end
end
DataSim(cont1,1) = C{1,2}(end,1);
DataSim = DataSim + DataAdjust;
DataMean = mean(DataSim);

```

```
DatatoZero = DataSim - DataMean;  
clc;
```

diafragm_velocity.m

```
function vd = diafragm_velocity(SPL)  
po = (10.^(SPL/20))*(20*10^(-6));  
vd = abs((po)/(0.8899*1i*1000*(pi*(0.025^2))));
```

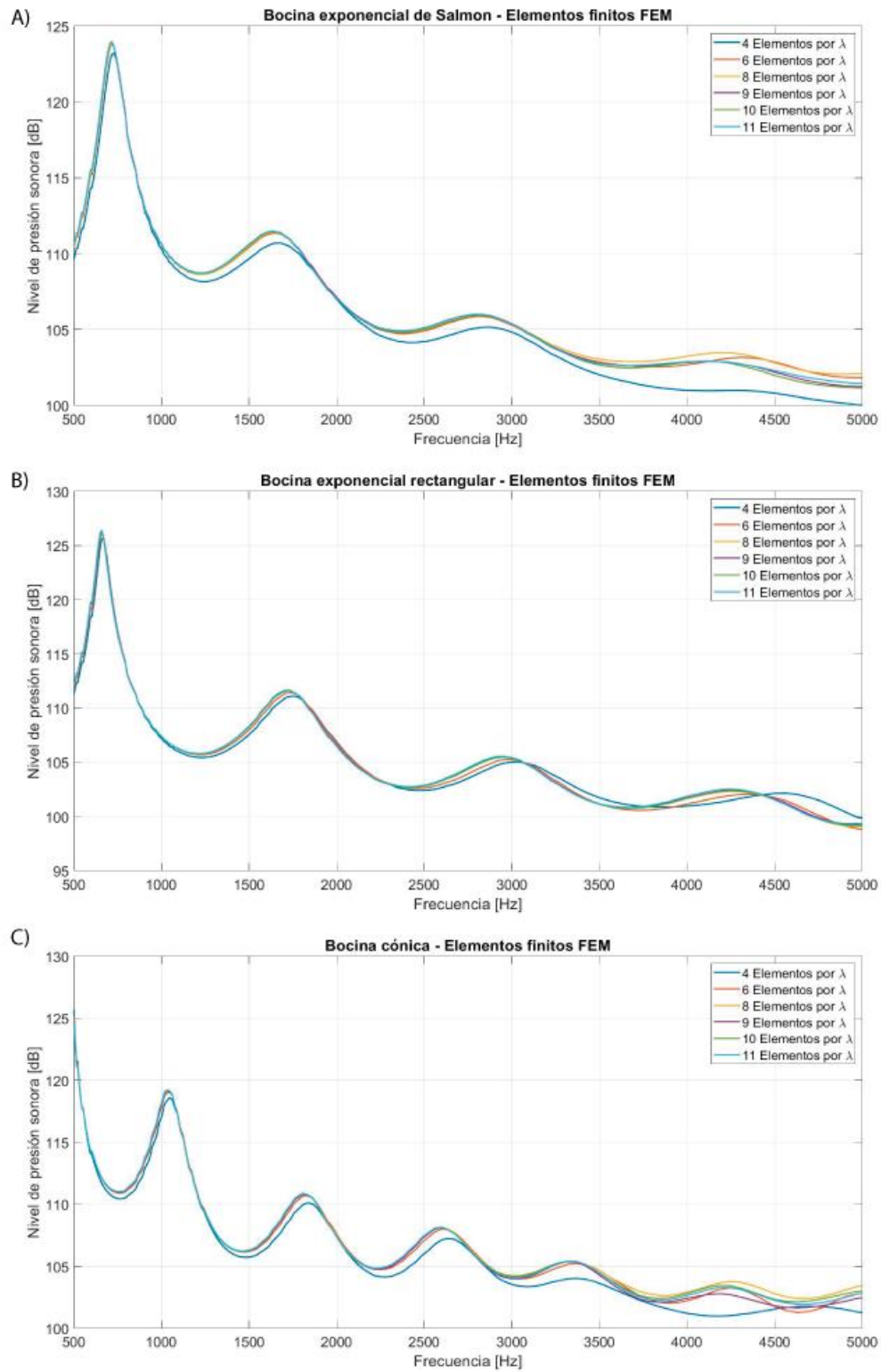

C. Anexo: estudio de convergencia de malla

Este estudio se realiza con el propósito de determinar el tamaño óptimo de los elementos para obtener resultados fiables al momento de cambiar las dimensiones de la malla. El proceso consiste en simular el problema acústico representado por un dominio discreto que está compuesto por mallas formadas con una cantidad diferente de elementos por cada longitud de onda λ de la frecuencia máxima a simular, siendo igual a 5000 Hz.

Se determina a partir de cuál número de elementos por λ los resultados logran converger teniendo en cuenta el número total de grados de libertad, o *degrees of freedom DOFs* en inglés, y el costo computacional; es decir, el tiempo empleado y la cantidad de memoria. La simulación se realizó en un computador, con una memoria RAM de 8 GB y un procesador Intel Core i5 de séptima generación. Se tiene en cuenta que en la versión estudiantil de ACTRAN VI sólo es posible realizar simulaciones de dominios discretos con un número menor a 33000 grados de libertad.

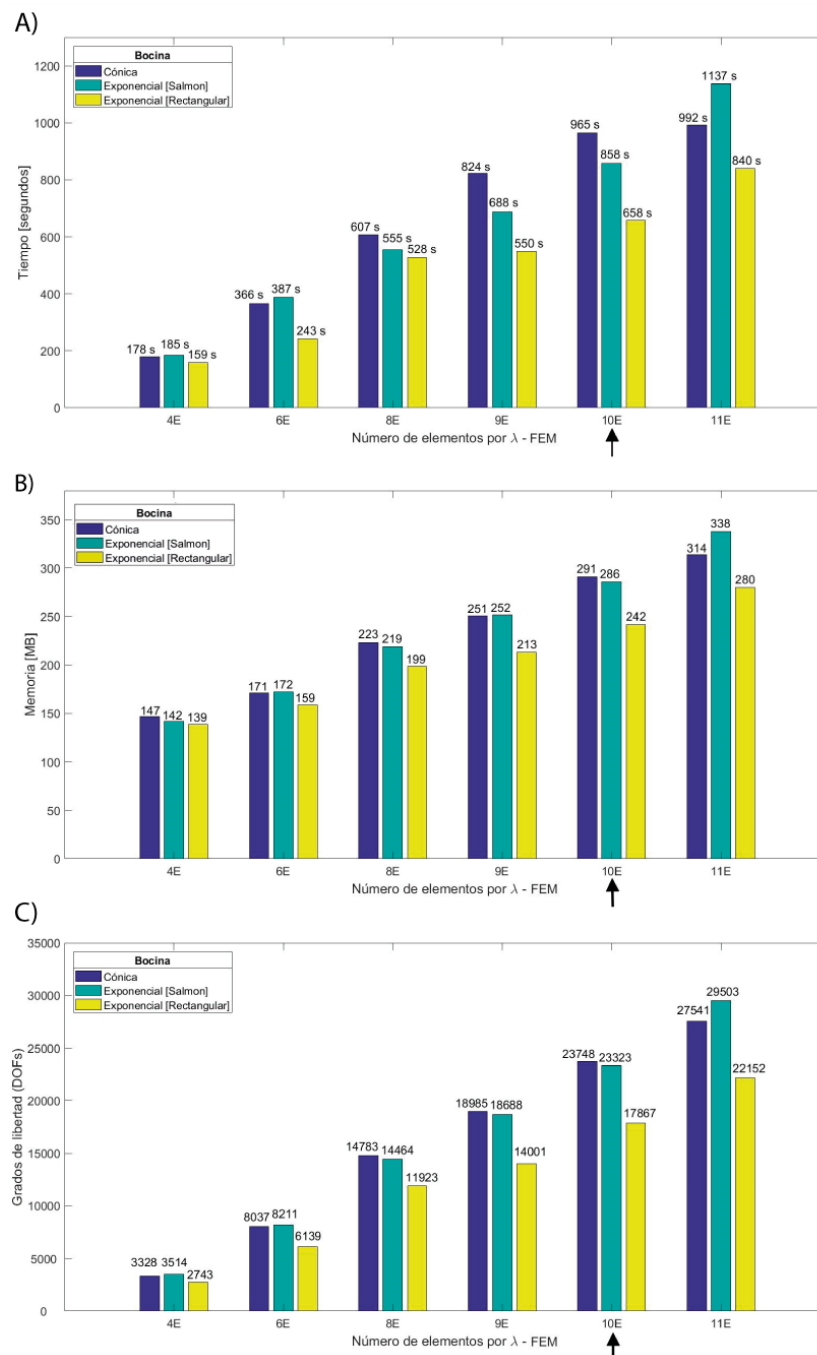
El problema acústico simulado consta de dominios formados con elementos finitos FE y elementos infinitos IE. El tamaño de los elementos finitos, dependiente de la λ , es definido en el momento en que se generan las mallas del dominio en el paquete ICEM CFD del software ANSYS. Por otro lado, el tamaño de los elementos infinitos IE depende del producto entre el tamaño de los FE y el orden de interpolación ingresado en el software ACTRAN VI, en la etapa de pre – procesamiento. Por tal razón, fue necesario hacer un estudio de convergencia considerando cada tipo de elemento FE/IE.

El primer paso de dicho estudio consistió en determinar la convergencia de los resultados en términos de los elementos finitos FE. Para los dominios de las tres bocinas, se generaron mallas de 4, 6, 8, 9, 10 y 11 elementos lineales por λ . En todas las simulaciones mencionadas con antelación, el orden de interpolación de los elementos infinitos ingresado fue igual a 3.

Figura C-1: Respuesta en frecuencia simulada con 4, 6, 8, 9, 10 y 11 elementos lineales por λ .

Fuente: propia

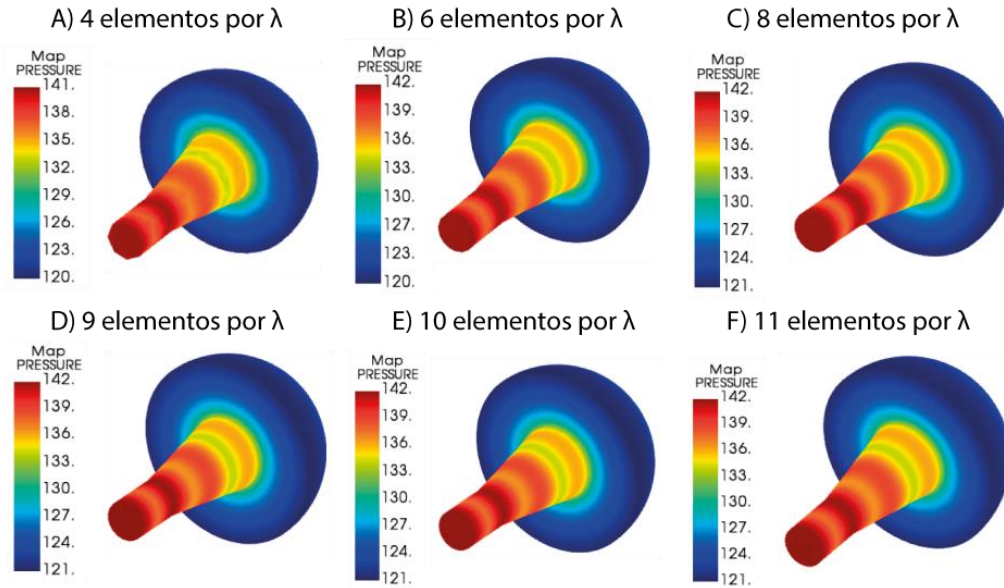
Figura C-2: Tiempo, memoria RAM y grados de libertad empleados con 4, 6, 8, 9, 10 y 11 elementos lineales²⁰.



Fuente: propia

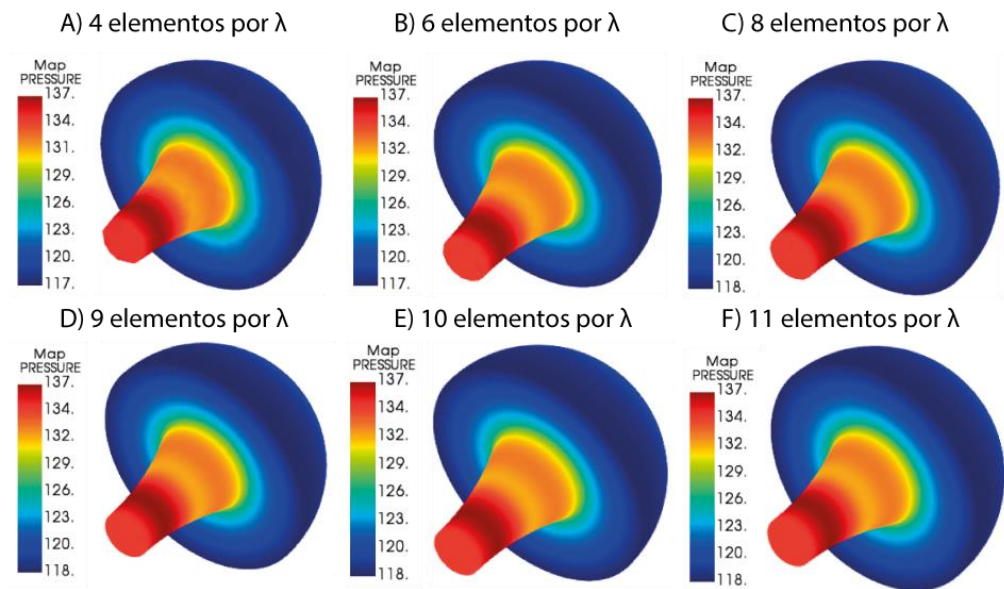
²⁰ La flecha negra indica el número de elementos, en el cual convergen los resultados de la simulación.

Figura C-3: Nivel de presión sonora, expresado en decibelios, simulado al interior de la bocina cónica en 2610 Hz.



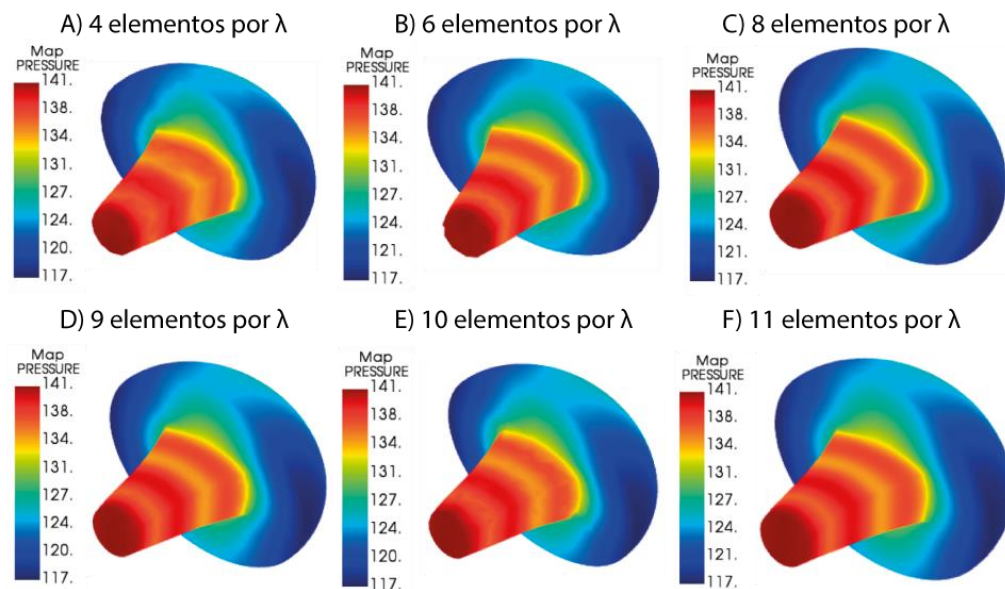
Fuente: propia

Figura C-4: Nivel de presión sonora, expresado en decibelios, simulado al interior de la bocina exponencial de Salmon en 2190 Hz.



Fuente: propia

Figura C-5: Nivel de presión sonora, expresado en decibelios, simulado al interior de la bocina exponencial rectangular en 3000 Hz.



Fuente: propia

Los resultados de la respuesta en frecuencia obtenida con la simulación de la bocina cónica, exponencial de Salmon y exponencial rectangular, convergen con una cantidad de 10 elementos lineales. Como se muestra en la Figura C-1, para las tres bocinas, las diferencias máximas son de 0.2 dB entre la RF simulada con 10 y 11 elementos. Entre las diferencias más significativas del costo computacional, ilustrado en la Figura C-2, se evidencia que; se consiguieron resultados semejantes al simular el problema acústico de la bocina exponencial de Salmon con 10 y 11 elementos por λ , a pesar de que se requirieron 279 segundos y 6180 grados de libertad más en la última malla; se obtuvieron respuestas en frecuencia iguales al efectuar la simulación de la bocina exponencial rectangular, con 10 y 11 elementos, aunque la última se demoró 182 segundos más que la primera, debido a que se resolvió una cantidad adicional de 4285 grados de libertad.

En la Figura C-3, la Figura C-4 y la Figura C-5, se muestra el nivel de presión sonora al interior de las tres bocinas, en función de las frecuencias en las que se hayan observado picos y valles en las RF. Se evidencian diferencias de apenas 0.1 decibelios entre las imágenes E y F de dichas Figuras, permitiendo la validación del estudio de convergencia para los elementos finitos FE.

Tabla C-1: Frecuencias de resonancia obtenidas en la simulación con el análisis directo de respuesta en frecuencia RF, en ACTRAN VI.

Bocina	Frecuencia [Hz]
Cónica	690, 1040, 1400, 1830, 2160, 3380, 3770, 4250, 4560
Exponencial rectangular	720, 1090, 1690, 2190, 2910, 3410, 4250
Exponencial de Salmon	660, 1080, 1740, 2280, 3000, 3500, 4340

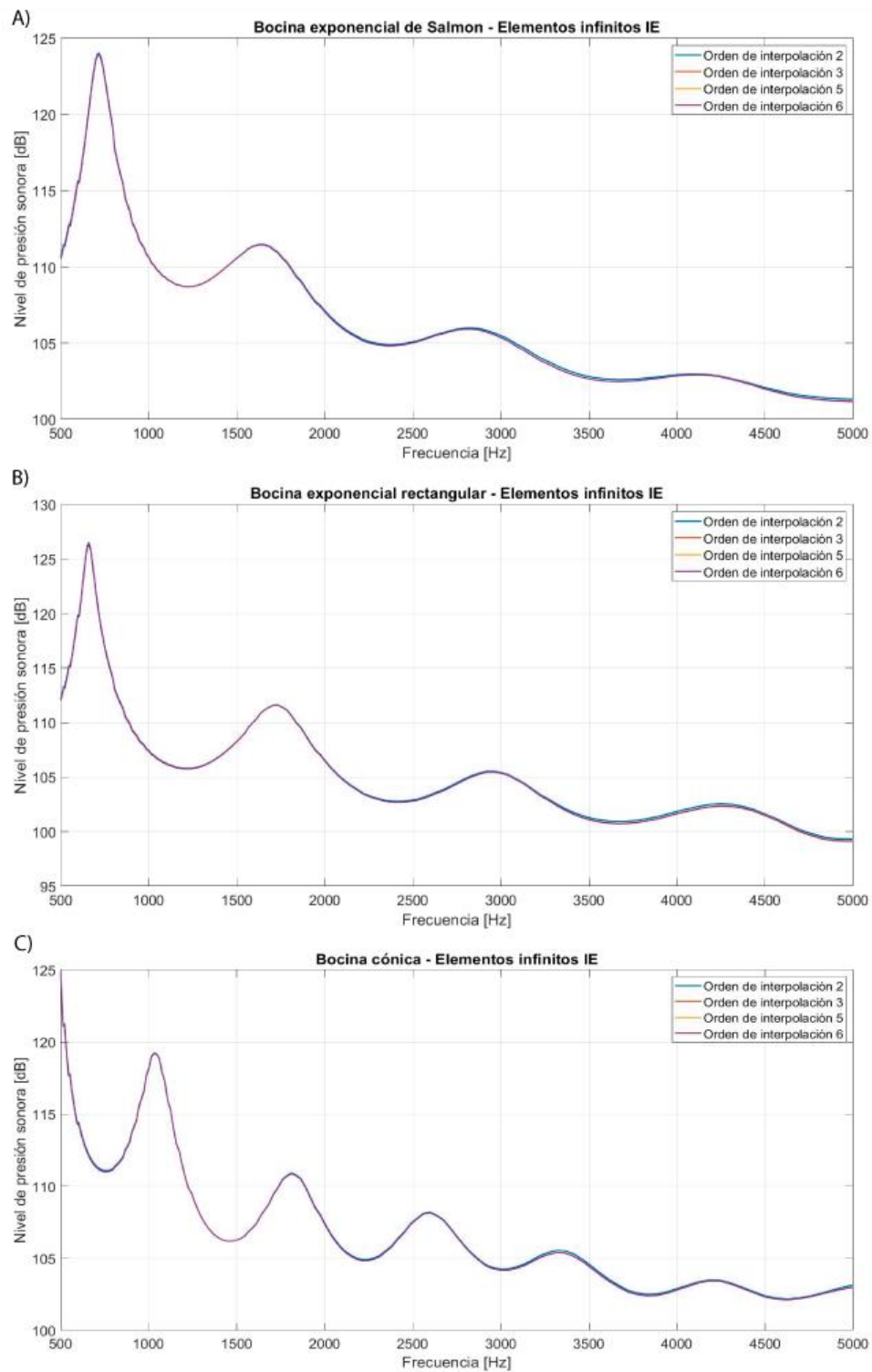
Fuente: propia

Al determinar la cantidad óptima de los elementos finitos, se procede a realizar el estudio de convergencia de los resultados con los elementos infinitos IE. Utilizando la malla de 10 elementos lineales, se hace la simulación variando el orden de interpolación del fluido infinito, en 2, 3, 5 y 6.

Como se ilustra en la Figura C-6, en los tres casos, la respuesta en frecuencia converge con la simulación hecha con el orden de interpolación 3. Las diferencias entre el nivel de presión sonora obtenido con el orden 2, 3, 5 y 6 es menor de 0.1 dB. No obstante, en comparación con los demás órdenes de interpolación, se requirió menor costo computacional para efectuar la simulación con el orden 3. Como se puede observar en la Figura C-7, a pesar de que se obtuvo resultados iguales de la RF en las simulaciones con el orden 3 y 6, se registró una diferencia temporal de 472 segundos en la bocina exponencial de Salmon, 292 segundos en la bocina exponencial rectangular y 299 segundos en la bocina cónica. Lo anterior, debido a que la diferencia de grados de libertad, entre los modelos con dichos órdenes de interpolación, es de 9453, 8790 y 6951 grados de libertad en las simulaciones de la bocina exponencial de Salmon, la bocina exponencial rectangular y la bocina cónica, respectivamente.

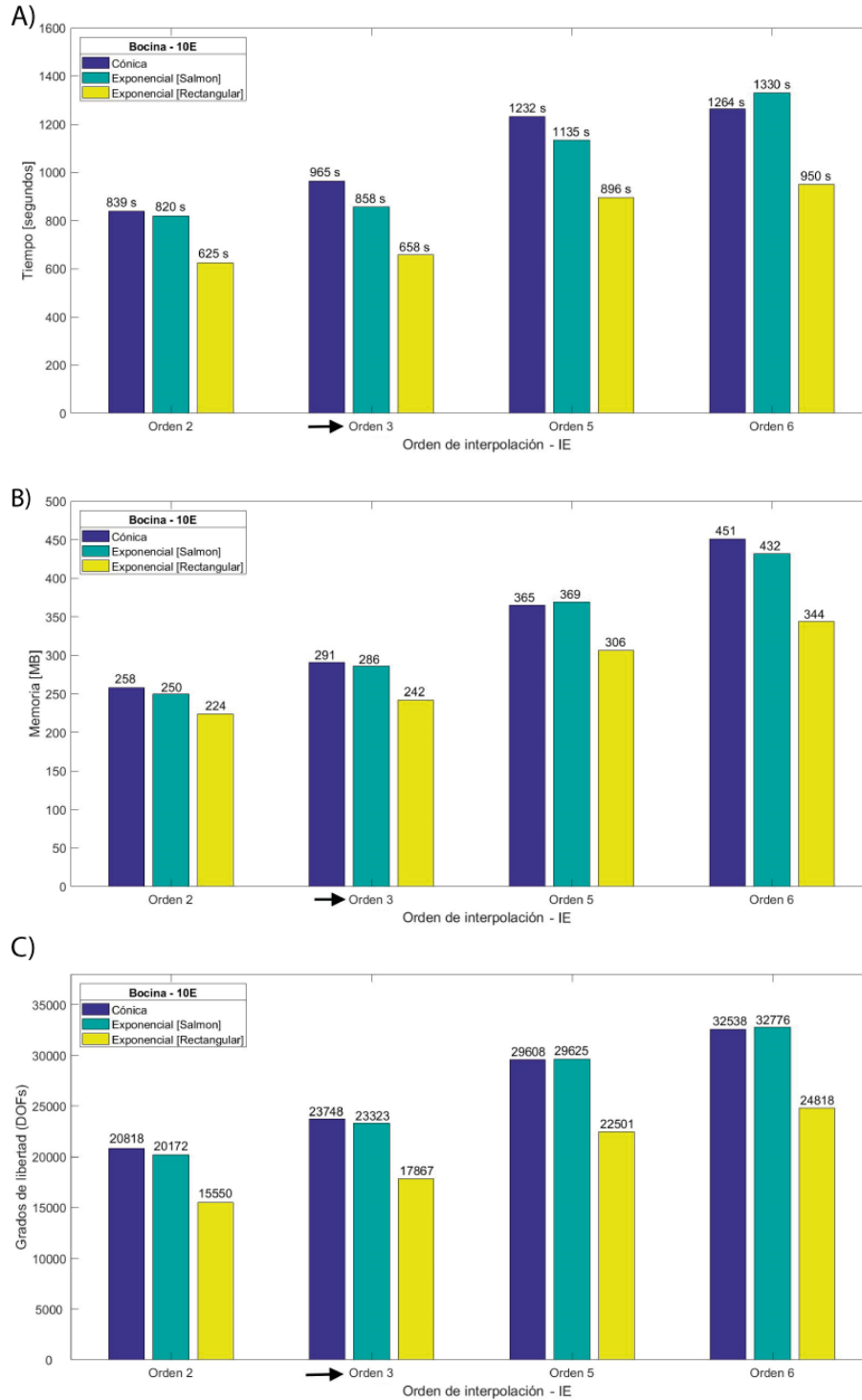
Al igual que el estudio realizado con los elementos finitos FE, la convergencia de los elementos infinitos IE se evidencia con el nivel de presión sonora SPL simulado al exterior de las bocinas. En la Figura C-8, la Figura C-9 y la Figura C-10 se ilustra dicha convergencia para cada bocina establecida en la investigación. En general, entre los órdenes de interpolación del 3 al 6, es decir, entre las Imágenes B, C, D y E de las Figuras mencionadas, las diferencias del SPL evidenciadas son menores a 0.1 decibelios.

Figura C-6: Respuesta en frecuencia simulada al variar el orden de interpolación de los elementos infinitos IE.



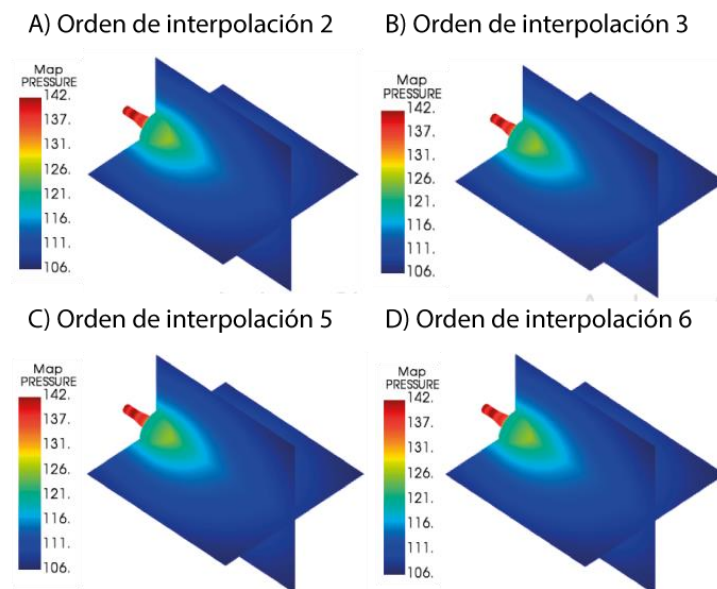
Fuente: propia

Figura C-7: Tiempo, memoria RAM y grados de libertad obtenidos al variar, a 2, 3, 5 y 6, el orden de interpolación de los elementos infinitos IE.



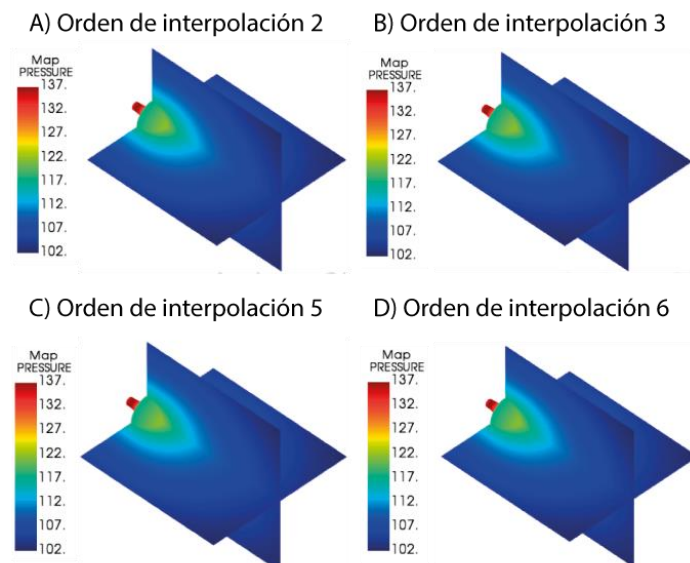
Fuente: propia

Figura C-8: Nivel de presión sonora, expresado en decibelios, simulado al interior y al exterior de la bocina cónica en 2610 Hz.



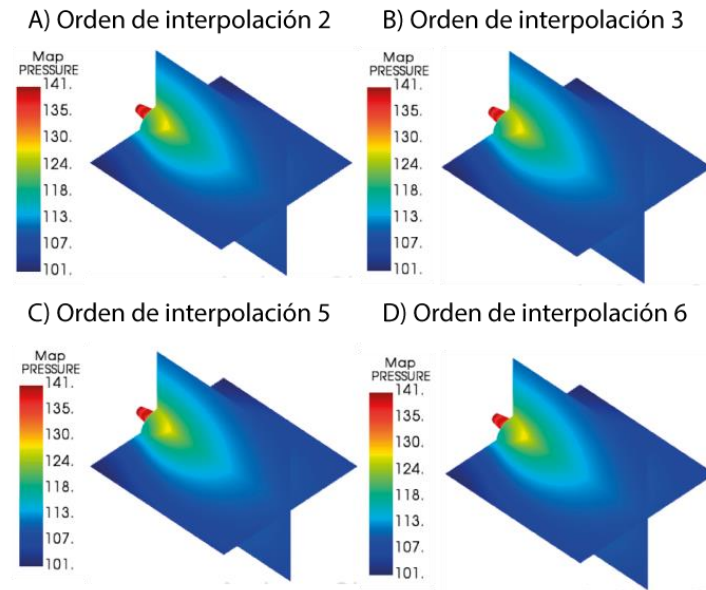
Fuente: propia

Figura C-9: Nivel de presión sonora, expresado en decibelios, simulado al interior y al exterior de la bocina exponencial de Salmon en 2190 Hz.



Fuente: propia

Figura C-10: Nivel de presión sonora, expresado en decibelios, simulado al interior y exterior de la bocina exponencial rectangular en 3000 Hz.



Fuente: propia

D. Anexo: análisis de componentes principales ACP

Es un análisis que tiene como propósito reducir las dimensiones de un conjunto de datos x_n , compuesto por una cantidad n de variables interrelacionadas, conservando la máxima cantidad posible de variación en el conjunto de datos original y, de esta manera, hallar las covarianzas o las correlaciones de dichas variables. Lo anterior se logra por medio de la transformación de los datos a una nueva muestra de variables, denominados “componentes principales”, que son no correlacionadas y ordenadas por la cantidad representada de la variación total de las variables originales.

En esta investigación, se aplicó el análisis de componentes principales a las respuestas en frecuencia obtenidas con: las tres configuraciones de medición, donde se colocó el *driver* de compresión sobre el suelo, a 15 centímetros del suelo y se suspendió en la base de altavoces; las simulaciones de dos dimensiones, en la bocina cónica y exponencial de Salmon, y de tres dimensiones. Por lo tanto, la matriz de datos del análisis almacena la presión sonora p de las 5 respuestas en frecuencia, para la bocina exponencial rectangular, y 6 RF para las bocinas restantes.

El primer paso, empleado en el análisis, es determinar una función lineal $\alpha_1'x$ de los datos x que tienen máxima varianza, donde α_1 es un vector de n constantes $(\alpha_{11}, \alpha_{12}, \dots, \alpha_{1n})$ y $'$ denota transposición:

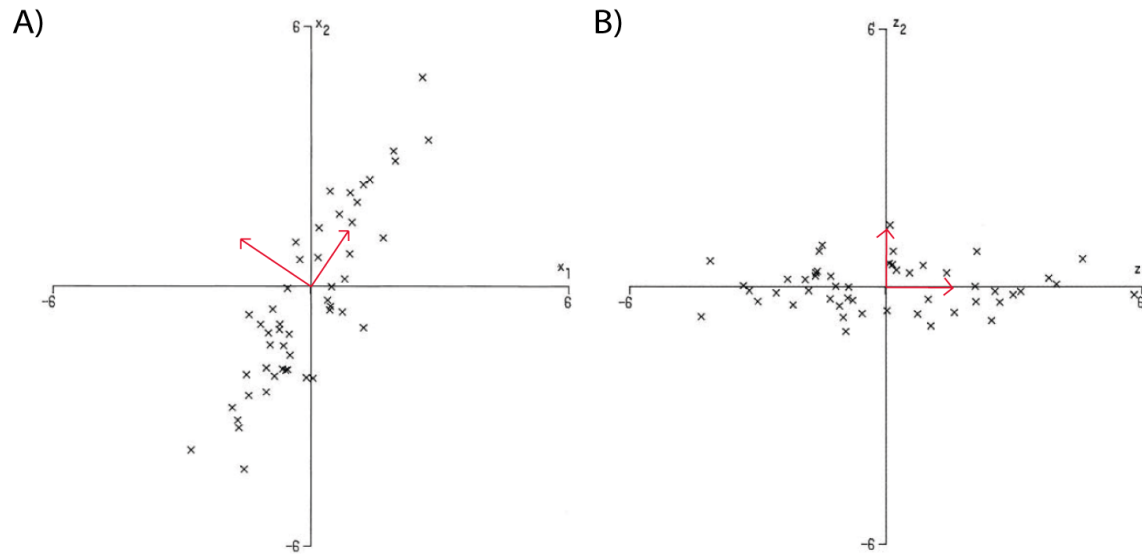
$$\alpha_1'x = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \dots + \alpha_{1n}x_n = \sum_{j=1}^n \alpha_{1j}x_j \quad (D.2)$$

Luego, se determina la siguiente función lineal $\alpha_2'x$, siendo no correlacionada con la función anterior $\alpha_1'x$, la cual representa la máxima varianza posible de las variables originales, y así sucesivamente, hasta que la varianza total corresponda con la función $\alpha_k'x$, número k , siendo no relacionada con las anteriores funciones $\alpha_1'x, \dots, \alpha_{k-1}'x$. La variable derivada k , siendo $\alpha_k'x$, es la

componente principal k PC. En el análisis se pueden obtener hasta n PCs, pero lo más esperado es que la máxima variación de los datos x esté representada hasta el m PC, donde $m \ll n$.

El conjunto de datos x se caracteriza por tener una matriz de covarianza Σ . Los componentes principales k PC son iguales a $z_k = \alpha_k' x$, donde α_k es el vector propio de la matriz Σ , el cual corresponde a su mayor valor propio λ_k . Los vectores propios de las funciones lineales permiten realizar la transformación de los datos x , por medio de un múltiplo escalar λ_k que no cambia su dirección. Los valores y vectores propios, λ_k y α_k , son obtenidos a través de los multiplicadores de *LaGrange*.

Figura D-1: Gráfica de dispersión de una muestra de datos en dos dimensiones, transformada por medio de los componentes principales²¹.



Fuente: (Jolliffe, 2002)

²¹ En rojo: vectores propios α_k de la muestra de datos. Figura A: gráfica de dispersión de las variables x_1 y x_2 . Figura B: gráfica de dispersión en función de las componentes principales z_1 y z_2 , escalados con el valor propio λ_k .

Aplicación del ACP

A continuación se detallan los pasos empleados en el análisis de componentes principales y, simultáneamente, se muestran los resultados del ACP correspondientes con las respuestas en frecuencias obtenidas con la bocina exponencial de Salmon. Luego, se ilustran los resultados obtenidos con las RF de la bocina exponencial rectangular y la bocina cónica.

Para realizar los cálculos correspondientes al ACP, se utilizó el entorno de programación libre *R* con el IDE RStudio. Los datos de las respuestas en frecuencia, procesados en este análisis, fueron importados en un archivo .CSV, generado en EXCEL.

Bocina exponencial de Salmon

Primero, se debe hallar la matriz de correlaciones entre las variables, en este caso, de las RF. Luego, se debe verificar si la correlación entre las respuestas en frecuencia obtenidas con las tres configuraciones de medición y las simulaciones son considerablemente altas, con el fin de justificar la factorización de la matriz.

Tabla D-1: Matriz de correlación de las respuestas en frecuencia medidas y simuladas con la bocina exponencial de Salmon.

		Medición			Simulación	
		Suspendido	15 cm	Suelo	3D	2D
Medición	Suspendido	1	0.416	0.331	-0.080	-0.194
	15 cm	0.416	1	0.800	0.565	0.336
	Suelo	0.331	0.800	1	0.829	0.696
Simulación	3D	-0.080	0.565	0.829	1	0.906
	2D	-0.194	0.336	0.696	0.906	1

Fuente: propia

Para verificar la viabilidad de la factorización se efectúa la prueba de Bartlett. La prueba de Bartlett evalúa la homocedasticidad de las muestras. Es decir, se aplica esta prueba con el fin de saber si las respuestas en frecuencia simuladas y medidas tienen varianzas homogéneas. Los resultados de la prueba, obtenidos con el software de análisis estadístico *R*, se expresan según el nivel de significancia p generado a partir de la distribución ji – cuadrado X^2 y los grados de libertad df . Si el nivel de

significancia es mayor o igual a 0.05, se aceptan que dichas varianzas son homogéneas o, dicho de otra manera, se acepta la hipótesis nula H_0 . De lo contrario, si el nivel de significancia es menor a 0.05, las varianzas son diferentes H_1 .

Tabla D-2: Resultados obtenidos en la prueba de Bartlett, aplicada a la respuesta en frecuencia, de la bocina exponencial de Salmon, medida y simulada.

Distribución ji – cuadrado (X^2)	Grados de libertad df	Nivel de significancia p
886.35	4	≈ 0 (H_1)

Fuente: propia

Debido a que no se acepta la hipótesis nula en las muestras, evidenciado con el bajo nivel de significancia, se realiza una segunda evaluación. En este estudio, se aplica la medida o el índice de adecuación muestral KMO, o *Kaiser-Meyer-Olkin* sobre los datos originales. En comparación con la prueba de Bartlett, el KMO se caracteriza por su menor sensibilidad ante la ausencia de normalidad de las muestras. Este método compara la magnitud de la correlación de las muestras con la magnitud de la correlación parcial. El índice puede variar en un rango de 0 a 1, y se expresa como se muestra en la Tabla D-3.

Tabla D-3: Calificación de la proporción de la varianza entre las muestras, según el índice KMO.

$KMO > 0.90$	Muy bueno
$0.90 > KMO > 0.80$	Bueno
$0.80 > KMO > 0.70$	Aceptable
$0.70 > KMO > 0.60$	Mediocre o regular
$0.60 > KMO > 0.50$	Malo
$0.50 > KMO$	Inaceptable o muy malo

Fuente: propia

Como se observa en la Tabla D-4, se calculó el índice KMO global y para cada una de las respuestas en frecuencia. Según el índice, la proporción de las varianzas en las muestras es “mediocre”. La

varianza de la respuesta en frecuencia con el *driver* de compresión suspendido es la que más se diferencia respecto a las demás, la cual, tiene un índice KMO es “inaceptable”, siendo equivalente a 0.4181. Tanto en la prueba de Bartlett como en el método KMO, se suele aumentar las muestras con el propósito de evaluar adecuadamente la proporción de la varianza.

Tabla D-4: Resultados del método de adecuación muestral KMO, aplicado a las respuestas en frecuencia medidas y simuladas con la bocina exponencial de Salmon.

Variable	KMO	Calificación
Parcial	0.6571	Mediocre
Medición - suspendido	0.4181	Inaceptable
Medición – 15 centímetros	0.6612	Mediocre
Medición - suelo	0.6868	Mediocre
Simulación – 3D	0.6858	Mediocre
Simulación – 2D	0.6411	Mediocre

Fuente: propia

Teniendo en cuenta el resultado del índice KMO en las RF de la bocina respectiva, se procede a hallar los valores λ_k y vectores propios a_k a partir de la matriz de correlación de los datos. Con lo anterior, se halla la desviación estándar, la proporción y acumulación de la varianza para cada uno de los PCs. La proporción de la varianza indica el porcentaje de varianza de los datos totales representada por cada componente, mientras que la proporción acumulativa es el porcentaje de varianza total representada hasta el componente principal m PC. Como se ilustra en la Tabla D-5, hasta el segundo componente principal hay una representación del 90.2% de la varianza total, donde este componente aporta un 27.8%.

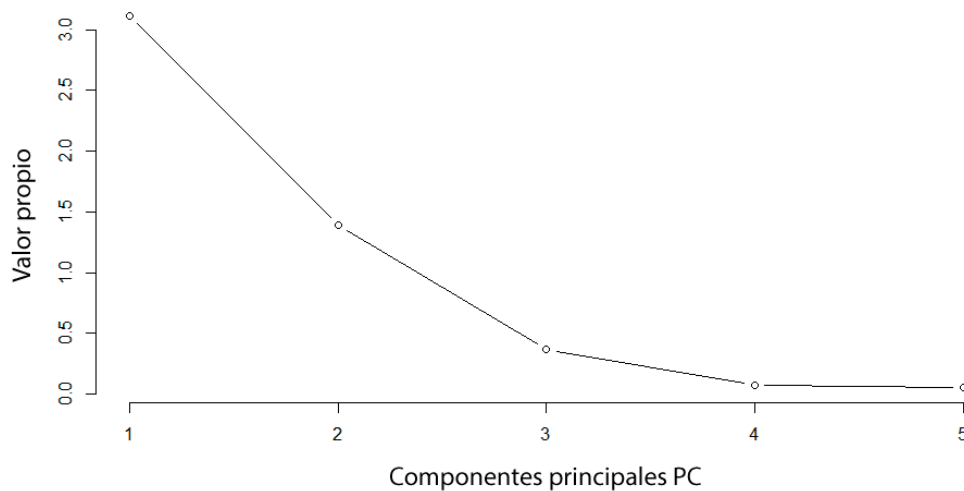
Tabla D-5: Desviación estándar y varianza de los componentes principales obtenidos en el análisis con la bocina exponencial de Salmon.

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5
Desviación estándar	1.765	1.18	0.603	0.265	0.237
Proporción de la varianza (%)	62.3	27.8	7.2	1.4	1.0
Proporción acumulativa (%)	62.3	90.2	97.5	98.9	100
Varianza	3.11	1.39	0.36	0.070	0.054

Fuente: propia

Debido a que la representación de la varianza disminuye por cada componente principal, se decidió conservar unos de los cinco *PCs* obtenidos. Para determinar dicha cantidad de componentes, se aplicó el criterio de Kaiser, que consiste en seleccionar aquellos componentes con una varianza mayor a 1. La varianza de cada *PC* indica el tamaño del valor propio λ_k . En la Figura D-2 se ilustra la gráfica de sedimentación, la cual, permite comparar visualmente el tamaño de los valores propios de cada componente principal.

Figura D-2: Gráfica de sedimentación de los componentes principales hallados en el ACP de la RF obtenidos con la bocina exponencial de Salmon.



Fuente: propia

Según la varianza indicada en la Tabla D-5 y la gráfica de la Figura anterior, se seleccionan los dos primeros componentes principales ya que sus valores propios son los únicos mayores a 1 y, como se había mencionado con antelación, explican el 90.2% de la varianza.

Por otro lado, se obtienen los vectores propios, los cuales están relacionados a los valores propios hallados. Las cargas de los vectores propios, que son la combinación lineal de las variables originales, se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla D-6: Cargas de los vectores propios de los componentes principales hallados en el análisis de las respuestas en frecuencia de la bocina exponencial de Salmon

Variable	PC 1	PC 2
Medición - suspendido	0.109	-0.774
Medición – 15 centímetros	0.442	-0.378
Medición - suelo	0.544	-0.141
Simulación – 3D	0.527	0.262
Simulación – 2D	0.465	0.410

Fuente: propia

A partir de la multiplicación entre la carga de los vectores propios y la desviación estándar de cada componente principal, se calcula la correlación entre las muestras y cada componente principal. Estas correlaciones son mostradas en la Tabla D-7.

Tabla D-7: Correlación entre los componentes principales *PC* y las variables originales.

Variable	PC 1	PC 2
Medición - suspendido	0.193	-0.914
Medición – 15 centímetros	0.781	-0.446
Medición - suelo	0.961	-0.167
Simulación – 3D	0.931	0.309
Simulación – 2D	0.822	0.485

Fuente: propia

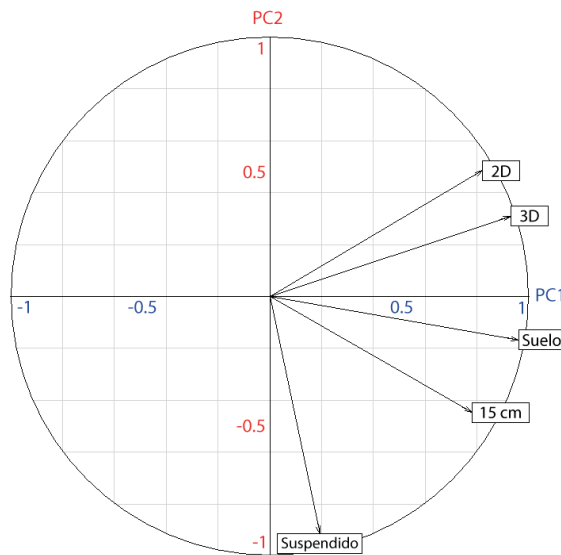
La correlación entre las variables y los componentes principales se puede representar gráficamente, así como se ilustra en el círculo de la Figura D-3. La interpretación que se realiza con dicha gráfica es la siguiente:

- Debido a que los vectores que representan las respuestas en frecuencia simuladas, se encuentran en el cuadrante $PC1 > 0$ y $PC2 > 0$, se confirma que las varianzas de estas muestras tienden a comportarse de una manera semejante. Las diferencias de la correlación entre estas RF y los componentes son similares: para el *PC1* es igual a 0.109, mientras que para el *PC2* es de 0.176. A pesar de que las dimensiones de la bocina se conservaron en el modelo 2D *axisymmetric* y

3D, se evidencia que las condiciones de contorno aplicadas en las dos configuraciones producen diferencias en el resultado de la RF.

- Por otro lado, a pesar de que los vectores de las RF medidas están ubicados en el cuadrante $PC1 > 0$ y $PC2 < 0$, se evidencian diferencias significativas entre las varianzas de estas muestras. La varianza de la respuesta en frecuencia, medida con el *driver* de compresión suspendido, está mejor representada por el componente principal 2 (-0.914), con una diferencia de 0.086 respecto a la unidad negativa de dicho componente, que por el componente principal 1 (0.193), con una diferencia de 0.807 respecto a la unidad positiva del componente mencionado. Las varianzas de las demás RF medidas están más representadas por el $PC1$: 0.78 para la RF medida con el *driver* a 15 centímetros y 0.96 para la RF con el *driver* ubicado en el suelo. Es decir, el comportamiento de la presión sonora, en función de la frecuencia, es considerablemente diferente entre las medición con el *driver* suspendido, respecto a las demás mediciones.
- La respuesta en frecuencia medida que tiene mayor correlación con el $PC1$ es la realizada con el *driver* sobre el suelo, mientras que la RF simulada con el coeficiente de correlación más alto es la obtenida con el modelo de 3 dimensiones. La diferencia entre dichas correlaciones es igual a 0.03. Además, entre una RF simulada y medida, la correlación que tienen estas muestras respecto al $PC2$ es la más cercana, con una diferencia de 0.476. Con esto, se concluye que la configuración más adecuada para medir la respuesta en frecuencia, en función de la simulación en 3D con el FEM, es la realizada con el *driver* ubicado en el suelo.

Figura D-3: Círculo de correlaciones entre las respuestas en frecuencia, medidas y simuladas en la bocina exponencial de Salmon, y los dos primeros componentes principales PC .



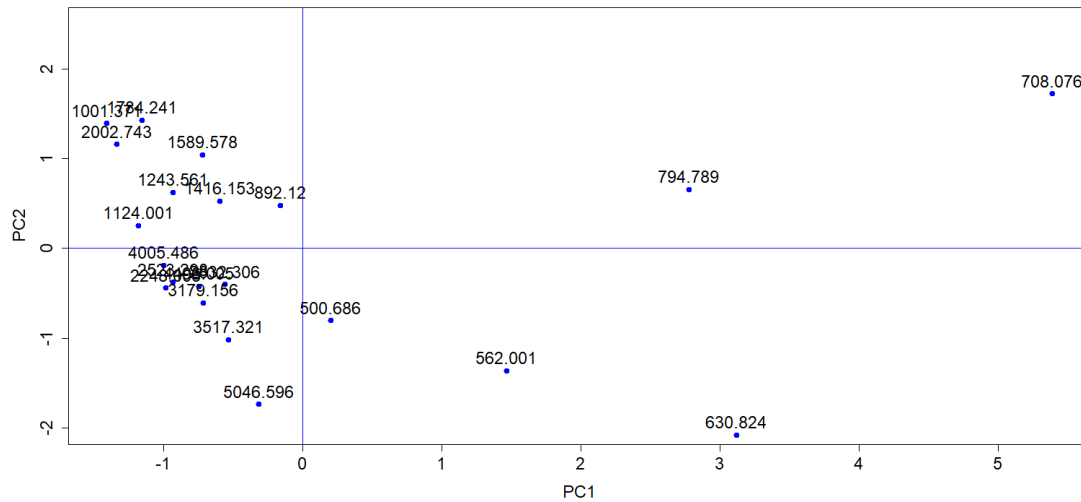
Fuente: propia

La Figura D-4 es una gráfica de dispersión, donde las coordenadas de cada individuo, es decir, cada frecuencia medida y simulada, dependen del valor obtenido en los dos componentes principales. Al igual que la dirección de los vectores propios de las variables se dirigen hacia uno de los cuatro cuadrantes del círculo de correlación, mostrado en la Figura D-19, las coordenadas de cada individuo también se ubican en uno de dichos cuadrantes. Las frecuencias que se ubiquen en el mismo cuadrante donde se dirige uno de los vectores propios, son aquellas en las que se registró una presión sonora alta en comparación con la varianza de los valores de la RF del respectivo vector a_k .

En la Figura D-4, y teniendo en cuenta la varianza de cada variable, se evidencia que en 708.76 Hz y 794.78 Hz, la presión sonora es más alta en las RF simuladas que en las medidas, debido a que se muestran en el cuadrante $PC1 > 0$ y $PC2 > 0$. En 630.824 Hz y 562.001 Hz, puesto que se ubican en el cuadrante $PC1 > 0$ y $PC2 < 0$, la presión sonora es más alta en las mediciones que en las simulaciones. En las demás frecuencias, la presión sonora resulta tener un valor más semejante.

Figura D-4: Representación de las respuestas en frecuencia, medidas y simuladas, en función de los dos primeros componentes principales PC^{22} .

²² Para facilitar la interpretación de la Figura, sólo se mostraron las frecuencias centrales de las bandas de un sexto $1/6$ de octava.



Fuente: propia

Bocina exponencial rectangular

Tabla D-8: Matriz de correlación de las respuestas en frecuencia medidas y simuladas con la bocina exponencial rectangular

		Medición			Simulación
		Suspendido	15 cm	Suelo	3D
Medición	Suspendido	1	0.66	0.548	0.463
	15 cm	0.66	1	0.896	0.811
	Suelo	0.548	0.896	1	0.851
Simulación	3D	0.463	0.811	0.851	1

Fuente: propia

Tabla D-9: Resultados obtenidos en la prueba de Bartlett, aplicada a la respuesta en frecuencia, medida y simulada, de la bocina exponencial rectangular.

Distribución ji – cuadrado (X^2)	Grados de libertad df	Nivel de significancia p
887.43	3	≈ 0 (H_1)

Fuente: propia

Tabla D-10: Resultados del método de adecuación muestral KMO, aplicado a las respuestas en frecuencia medidas y simuladas con la bocina exponencial rectangular.

Variable	KMO	Calificación
Parcial	0.777	Aceptable
Medición - suspendido	0.791	Aceptable
Medición – 15 centímetros	0.743	Aceptable
Medición - suelo	0.757	Aceptable
Simulación – 3D	0.838	Bueno

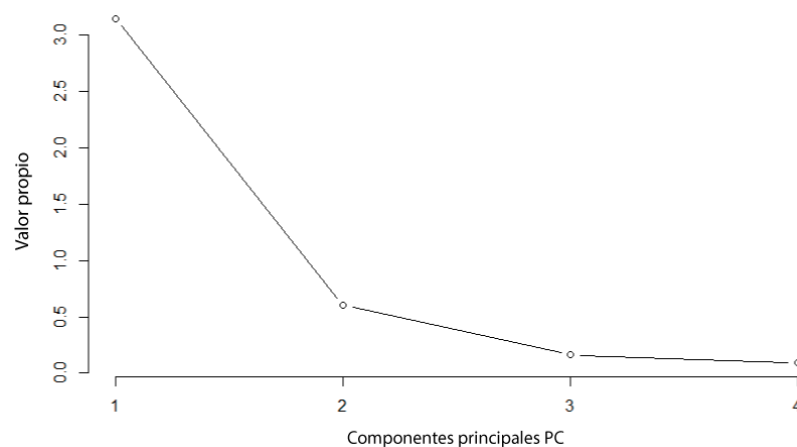
Fuente: propia

Tabla D-11: Desviación estándar y varianza de los componentes principales obtenidos en el análisis con la bocina exponencial rectangular.

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
Desviación estándar	1.772	0.774	0.404	0.306
Proporción de la varianza (%)	78.5	14.9	4.08	2.35
Proporción acumulativa (%)	78.5	93.5	97.6	100
Varianza	3.14	0.59	0.16	0.09

Fuente: propia

Figura D-5: Gráfica de sedimentación de los componentes principales hallados en el ACP de la RF obtenidos con la bocina exponencial rectangular.



Fuente: propia

Tabla D-12: Cargas de los vectores propios de los componentes principales hallados en el análisis de las respuestas en frecuencia de la bocina exponencial rectangular

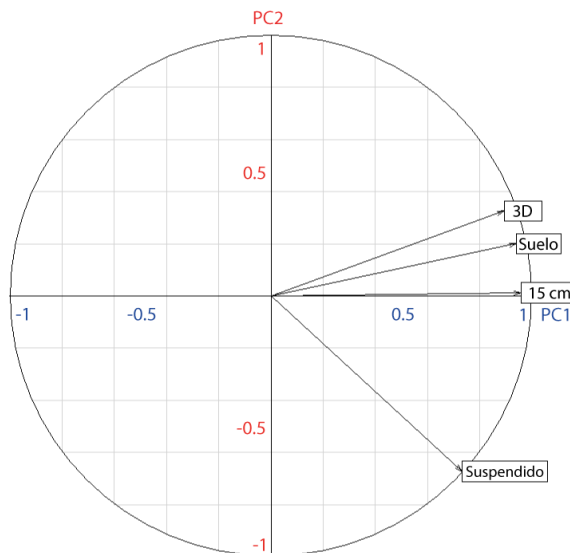
Variable	PC 1	PC 2
Medición - suspendido	0.413	-0.868
Medición – 15 centímetros	0.540	0.015
Medición - suelo	0.531	0.259
Simulación – 3D	0.504	0.421

Fuente: propia

Tabla D-13: Correlación entre los componentes principales *PC* y las variables originales.

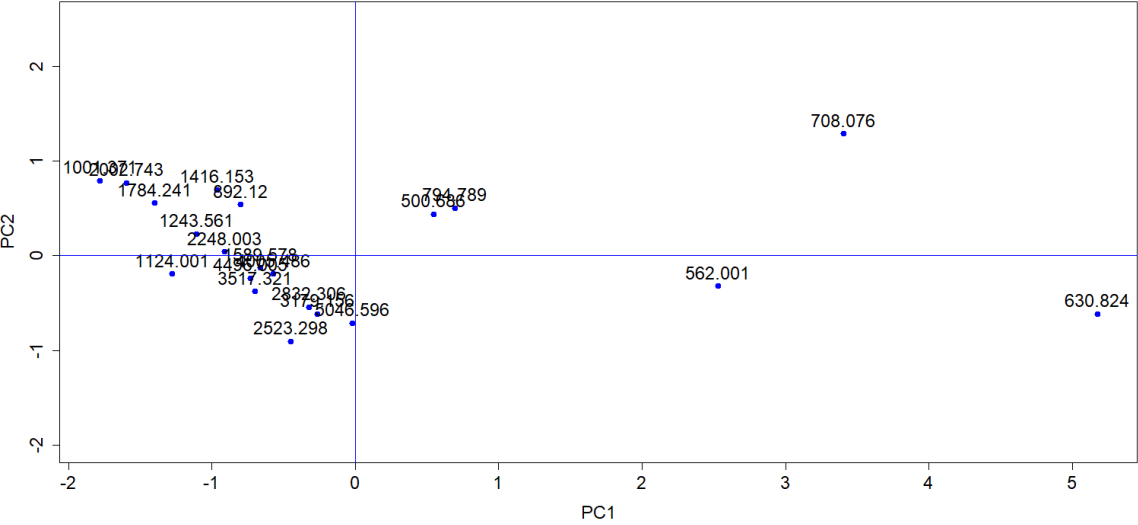
Variable	PC 1	PC 2
Medición - suspendido	0.732	-0.672
Medición – 15 centímetros	0.958	0.011
Medición - suelo	0.941	0.200
Simulación – 3D	0.895	0.326

Fuente: propia

Figura D-6: Círculo de correlaciones entre las respuestas en frecuencia, medidas y simuladas en la bocina exponencial rectangular, y los dos primeros componentes principales *PC*.

Fuente: propia

Figura D-7: Representación de las respuestas en frecuencia, medidas y simuladas, en función de los dos primeros componentes principales PC^{23} .



Fuente: propia

Bocina cónica

Tabla D-14: Matriz de correlación de las respuestas en frecuencia medidas y simuladas con la bocina cónica.

		Medición			Simulación	
		Suspendido	15 cm	Suelo	3D	2D
Medición	Suspendido	1	0.498	0.501	0.300	0.296
	15 cm	0.498	1	0.843	0.510	0.317
	Suelo	0.501	0.843	1	0.328	0.129
Simulación	3D	0.300	0.510	0.328	1	0.919
	2D	0.296	0.317	0.129	0.919	1

Fuente: propia

²³ Para facilitar la interpretación de la Figura, sólo se mostraron las frecuencias centrales de las bandas de un sexto $1/6$ de octava.

Tabla D-15: Resultados obtenidos en la prueba de Bartlett, aplicada a la respuesta en frecuencia, medida y simulada, de la bocina cónica.

Distribución ji – cuadrado (χ^2)	Grados de libertad df	Nivel de significancia p
687.89	4	≈ 0 (H_1)

Fuente: propia

Tabla D-16: Resultados del método de adecuación muestral KMO, aplicado a las respuestas en frecuencia medidas y simuladas con la bocina cónica.

Variable	KMO	Calificación
Parcial	0.589	Malo
Medición - suspendido	0.695	Mediocre
Medición – 15 centímetros	0.66	Mediocre
Medición - suelo	0.620	Mediocre
Simulación – 3D	0.547	Malo
Simulación – 2D	0.492	Inaceptable

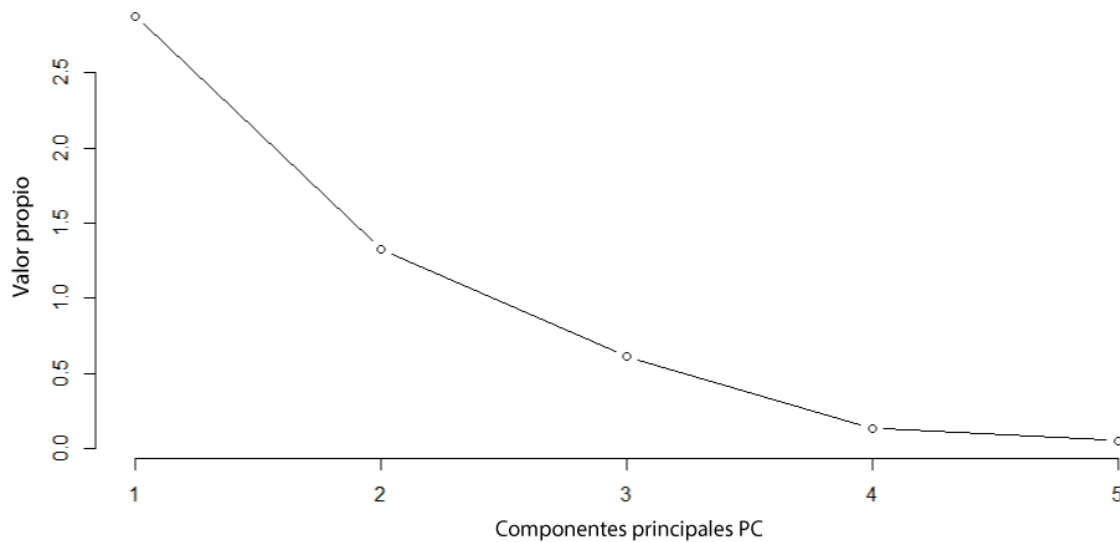
Fuente: propia

Tabla D-17: Desviación estándar y varianza de los componentes principales obtenidos en el análisis con la bocina cónica.

	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5
Desviación estándar	1.696	1.152	0.781	0.364	0.220
Proporción de la varianza (%)	57.57	26.57	12.22	2.66	0.97
Proporción acumulativa (%)	57.57	84.14	96.36	99.02	100
Varianza	2.87	1.32	0.61	0.13	0.04

Fuente: propia

Figura D-8: Gráfica de sedimentación de los componentes principales hallados en el ACP de la RF obtenidos con la bocina cónica.



Fuente: propia

Tabla D-18: Cargas de los vectores propios de los componentes principales hallados en el análisis de las respuestas en frecuencia de la bocina cónica.

Variable	PC 1	PC 2
Medición - suspendido	0.392	-0.252
Medición – 15 centímetros	0.502	-0.319
Medición - suelo	0.442	-0.491
Simulación – 3D	0.478	0.476
Simulación – 2D	0.411	0.605

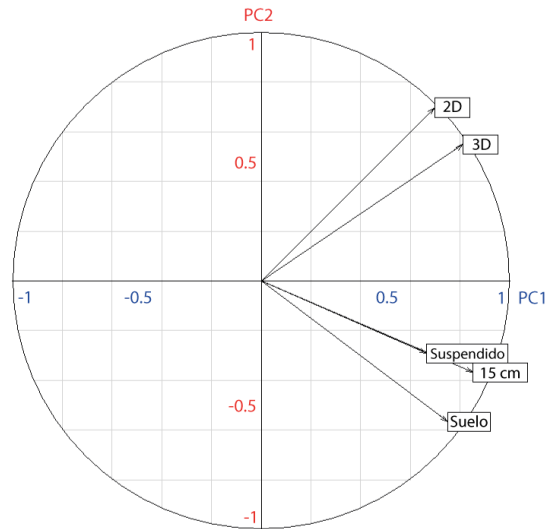
Fuente: propia

Tabla D-19: Correlación entre los componentes principales *PC* y las variables originales.

Variable	PC 1	PC 2
Medición - suspendido	0.66	-0.290
Medición – 15 centímetros	0.852	-0.368
Medición - suelo	0.75	-0.566
Simulación – 3D	0.811	0.549
Simulación – 2D	0.697	0.697

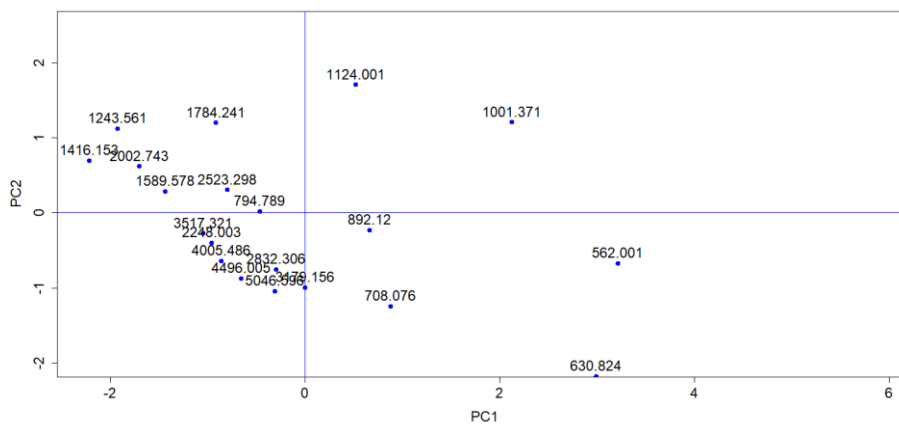
Fuente: propia

Figura D-9: Círculo de correlaciones entre las respuestas en frecuencia, medidas y simuladas en la bocina cónica, y los dos primeros componentes principales PC .



Fuente: propia

Figura D-10: Representación de las respuestas en frecuencia, medidas y simuladas, en función de los dos primeros componentes principales PC^{24} .



Fuente: propia

²⁴ Para facilitar la interpretación de la Figura, sólo se mostraron las frecuencias centrales de las bandas de un sexto $1/6$ de octava.

A continuación, se muestra el código ejecutado en el software de análisis estadístico R:

```
# Variable "data" que almacena las RF medidas y simuladas -----
data = Analisis.de.componentes.principales
attach(data)

#Anomalía en el conjunto de datos de las RF
which(is.na(data))

#Matriz de coeficientes de correlación de las RF
Rcor = cor(data)

#Test de Bartlett
bartlett.test(data)

#Test KMO -----
kmo(data)

#Normalización: estandarización
scaleddata = scale(data)

#Cálculo de los componentes principales
acp = prcomp(scaleddata)
acp

#Desviación estándar y proporción de la varianza
summary(acp)

#Desviación estándar
desv_stand = acp[[1]]
desv_stand

#Varianza
variance = desv_stand^2
variance
```

```
#Gráfica de sedimentación
```

```
Sedimentacion <- prcomp(scaleddata)
```

```
plot(Sedimentacion, type = "lines")
```

```
#Extracción del primer componente principal CP1
```

```
CP1 = acp[[2]][,1]
```

```
CP1
```

```
#Extracción del segundo componente principal CP2
```

```
CP2 = acp[[2]][,2]
```

```
CP2
```

```
#Orden de CP1 y CP2
```

```
Comp_prin = cbind(CP1,CP2)
```

```
Comp_prin
```

```
#Correlación con el CP1
```

```
Comp_prin1 = Comp_prin[,1]*desv_stand[1]
```

```
Comp_prin1
```

```
#Correlación con el CP2
```

```
Comp_prin2 = Comp_prin[,2]*desv_stand[2]
```

```
Comp_prin2
```

```
#Orden de la matriz de correlaciones
```

```
Comp_prinf = cbind(Comp_prin1,Comp_prin2)
```

```
Comp_prinf
```

```
#Orden de la matriz de correlaciones
```

```
individuos = acp$x[,1:2]
```

```
individuos[,1] = individuos[,1]
```

```
#Llamado a la librería de gráficas “ade4”
```

```
library(ade4)
```

```
#Frecuencias centrales
```

```
fn = c(1,9,17,25,33,41,49,57,64,73,81,89,97,105,113,121,129,136,145,153,161)
```

```
#Extracción de los vectores propios de las frecuencias centrales
```

```
tograph = individuos[c(1,9,17,25,33,41,49,57,64,73,81,89,97,105,113,121,129,136,145,153,161),1:2]
```

```
#Gráfica del círculo de correlaciones
```

```
x11()
```

```
s.corcircle(Comp_prinf, sub = " ", possub = "top")
```

```
#Gráfica de la nube de individuos
```

```
x11()
```

```
plot(tograph, xlab = 'PC1', ylab = 'PC2', main = ' ', ylim = c(-2, 2.5), col= "blue", pch = 19, cex.axis = 1.5,  
cex.lab = 1.5, cex.sub = 1.5, lty = "solid", lwd = 2)
```

```
text(tograph, labels=rownames(tograph), cex= 1.5, pos = 3)
```

```
abline(v=0, col="blue")
```

```
abline(h=0, col="blue")
```


E. Anexo: caracterización, comparación y correlación de las respuestas en frecuencia medidas

Caracterización.

A continuación, se describe la interpretación que se expresan con las medidas estadísticas descriptivas en el comportamiento de las respuestas en frecuencia:

- El diagrama de cajas y bigotes, siendo un gráfico útil para observar la distribución y la asimetría de la presión sonora p obtenida en la respuesta en frecuencia. Con esta medida, se considera el orden ascendente de los valores lineales de p . Este gráfico muestra: la mediana, o denominada cuartil $Q2$, la cual es el valor central de la presión sonora p ordenada; el cuartil $Q1$ y $Q3$, que representa la presión sonora obtenida con el 25% y el 75% de las frecuencias, respectivamente; el valor máximo y mínimo de p de la respuesta en frecuencia; los valores atípicos, los cuales son significativamente mayores y menores al conjunto de datos de la RF.

Este diagrama está compuesto por una caja y unas líneas externas, denominadas bigotes. La caja está formada por los cuartiles $Q1$ y $Q3$. La línea, ubicada al interior de la caja, es la mediana $Q2$. Los bigotes se extienden desde los extremos de la caja hasta el valor máximo y mínimo. Los valores atípicos se muestran con los asteriscos mostrados por fuera de los bigotes y de la caja.

Lo ideal, es que la mediana se muestre equidistante de los cuartiles $Q1$ y $Q3$. De lo contrario, se evidenciaría una asimetría en los valores lineales de la presión sonora p , causada por picos o valles. Por otro lado, se espera que los bigotes tengan un corto recorrido respecto a $Q1$ y $Q3$, demostrando que el rango, siendo la diferencia entre el valor máximo y mínimo de presión sonora, es relativamente bajo. La ausencia de los valores atípicos demuestra que la respuesta en frecuencia no presenta picos y/o valles significativos.

- La desviación estándar DE , como una medida que describe el grado de dispersión de la respuesta en frecuencia con respecto a la media aritmética de la presión sonora p . La desviación es expresada como en pascales, siendo 0 Pa el valor más ideal.
- El coeficiente de asimetría de Pearson γ , siendo el valor numérico que representa la distribución del conjunto de valores p obtenidos en una respuesta en frecuencia.

Si $\gamma \approx 0$, la mediana y la media aritmética de la presión sonora son aproximadamente iguales y, por consiguiente, las diferencias entre los valores de la presión sonora p mayores e inferiores, respecto a la mediana, son semejantes.

Si $\gamma > 0$, las diferencias entre los valores máximos de la presión sonora p y la mediana, son significativamente altas respecto a las diferencias de los valores de p menores que dicha mediana. En este caso, se demuestra que la respuesta en frecuencia es afectada por los picos de la presión sonora p .

Si $\gamma < 0$, las diferencias entre los valores mínimos de la presión sonora p y la mediana, son significativamente bajas respecto a las diferencias de los valores de p menores que dicha mediana. En este caso, se demuestra que la respuesta en frecuencia es afectada por los valles de la presión p .

- El rango R , que expresa la diferencia en decibelios entre el valor máximo y el valor mínimo de la presión sonora de cada respuesta en frecuencia.

En este anexo, se muestran los resultados de estas medidas estadísticas descriptivas por cada RF, calculados considerando el rango de frecuencias establecido y las bandas de octava con las frecuencias centrales de 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz.

Diferencias Δ .

La comparación de la respuesta en frecuencia de las bocinas, con y sin material absorbente en su interior, se evaluó considerando las siguientes variables:

- La diferencia del nivel de presión sonora promedio ΔSPL , producida al implementar el material absorbente. Se calcula, con el fin de determinar si dichos materiales causan una reducción del nivel y, por consecuencia, afectan la eficiencia que genera la bocina por el acople de impedancias con el *driver* de compresión y el aire. La diferencia del nivel de presión sonora ΔSPL se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\Delta SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1} \right) \quad (6.1)$$

Donde \bar{p}_1 y \bar{p}_2 es la media aritmética de la presión sonora de la respuesta en frecuencia con y sin material absorbente, respectivamente.

- La diferencia de la desviación estándar ΔDE . Lo ideal, es que esta medida de grado de dispersión disminuya al aplicar el material absorbente. Dicho de otro modo, la diferencia entre los valores de presión sonora respecto a su promedio \bar{p} se reduce.
- La diferencia del rango ΔR . Al implementar el material absorbente, se espera que el valor máximo y el valor mínimo de presión sonora sean más semejantes, es decir, que se reduzca la diferencia entre los picos y los valles de la respuesta en frecuencia. No obstante, se conjetura que el rango R puede aumentar en algunas RF con el material implementado.
- La diferencia del coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$. Lo deseado, es que los valores de la presión sonora se distribuyan homogéneamente con el material absorbente. Es decir, que la diferencia entre los valores mayores y menores, respecto a la mediana Q_2 , sean semejantes. Al obtener esto, se demuestra que los picos son igual de significativos que los valles de la respuesta en frecuencia. Al igual que con las medidas descritas anteriormente, se observa en la Figura 6-1, tanto en el diagrama de cajas como en el coeficiente de asimetría, que la distribución de la presión sonora varía con el material absorbente y con su ubicación, siendo más favorables en algunos casos que en otros. La diferencia del coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$ se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$\Delta \gamma = \gamma_1 - \gamma_2 \quad (6.2)$$

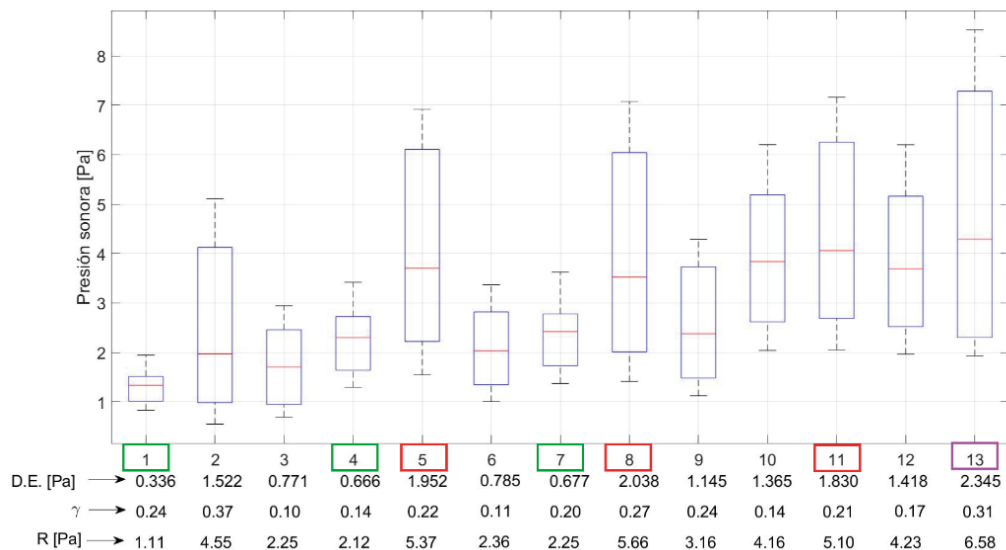
Donde γ_1 y γ_2 es el coeficiente obtenido con y sin material absorbente, respectivamente. Si $\Delta \gamma > 0$, en las RF con material absorbente se registra que la mediana de la presión sonora p es menor

que el promedio \bar{p} y, por lo tanto, se verifica que en la mayoría de frecuencias se midió una presión p inferior a \bar{p} . Es decir que, considerando el promedio \bar{p} y al implementar el material absorbente, los picos de la presión sonora tienden a ser más significativos que los medidos sin material. De lo contrario, si $\Delta\gamma < 0$, en las RF con material absorbente se registra que la mediana de la p es mayor que \bar{p} . En otras palabras, los valles de la presión sonora de las RF medidas con material absorbente tienden a ser más significativos que los registrados sin material, teniendo en cuenta el promedio de la presión sonora. Si $\Delta\gamma \approx -0$, la simetría de la presión sonora p no presenta variaciones significativas entre las RF medidas con y sin material absorbente.

Estas diferencias, calculadas para el rango de frecuencias establecido y para cada banda de octava con una f_c igual a 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz, se detallan para las respuestas en frecuencia medidas con la bocina exponencial de Salmon. Luego, se muestran las comparaciones de dichas variables para la bocina exponencial rectangular y la bocina cónica. Las doce unidades conformadas en el eje horizontal de las siguientes Figuras son las respuestas en frecuencia medidas con el material absorbente, indicadas según el orden mencionado en el “Capítulo VI. Discusión”. Con los cuadros verdes y rojos, se señalan las RF con las medidas descriptivas más favorables y desfavorables.

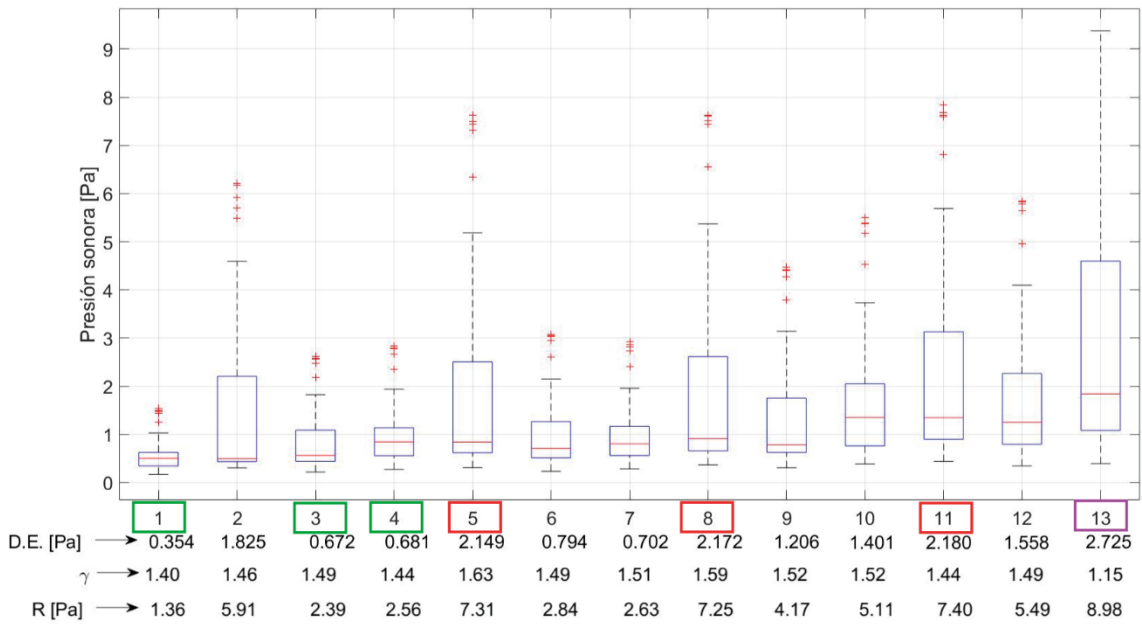
Bocina exponencial de Salmon

Figura E-1: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 500$ Hz.



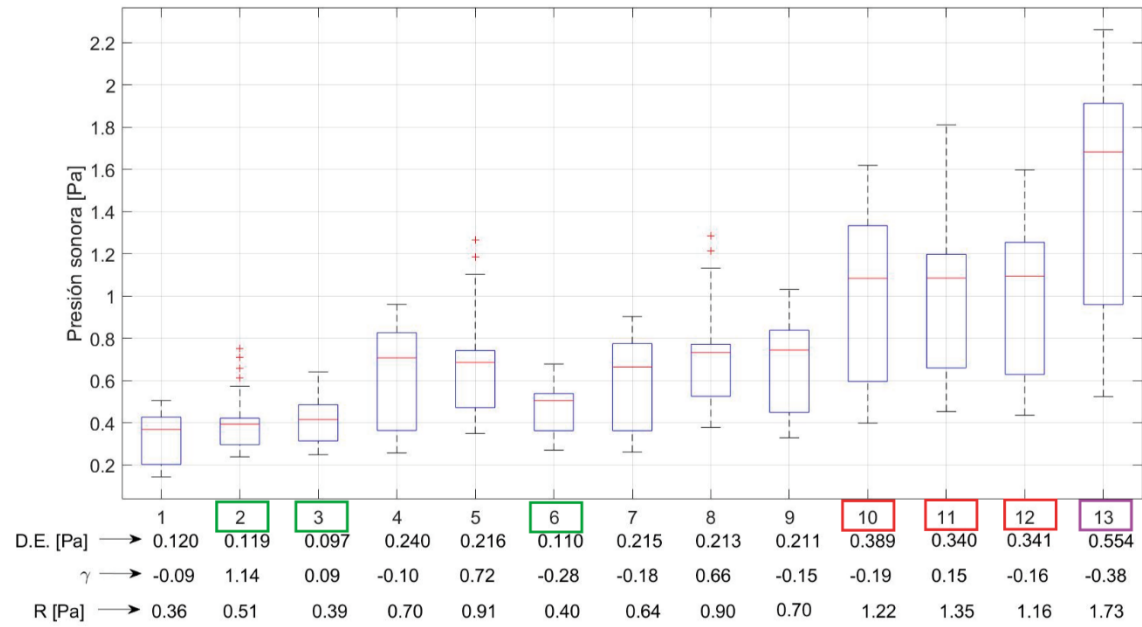
Fuente: propia

Figura E-2: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 1000\text{ Hz}$.

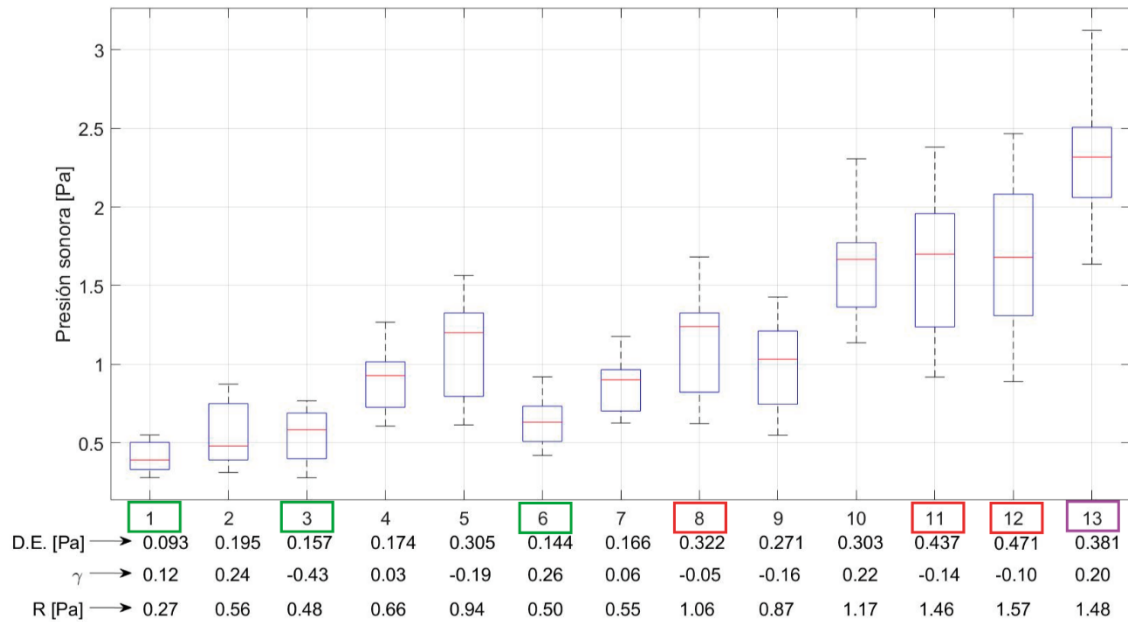


Fuente: propia

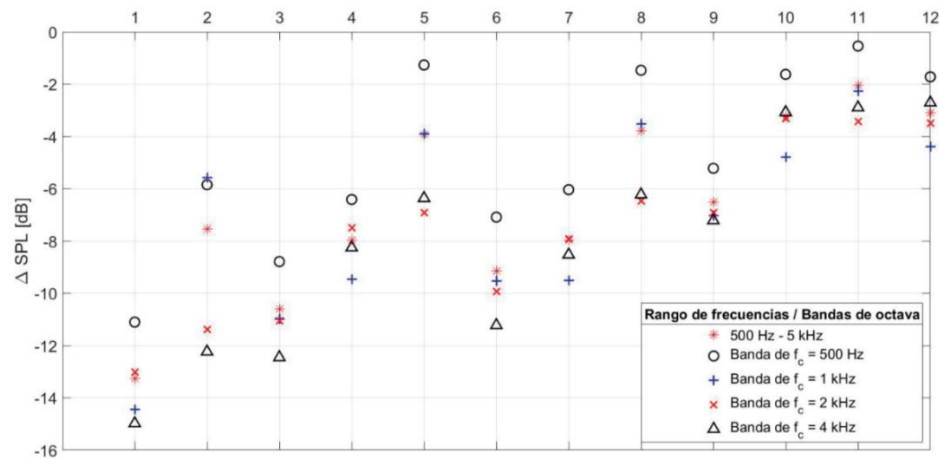
Figura E-3: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 2000\text{ Hz}$.



Fuente: propia

Figura E-4: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 4000 \text{ Hz}$.

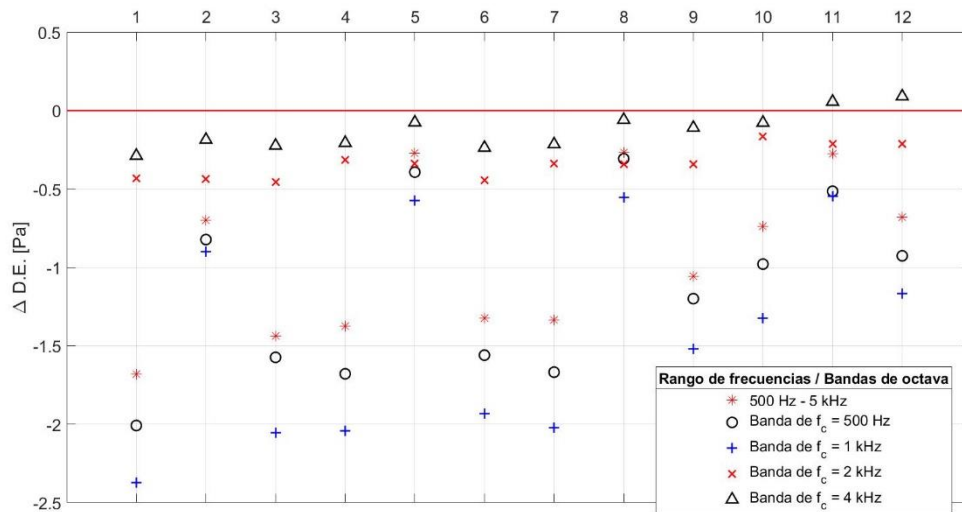
Fuente: propia

Figura E-5: Diferencia Δ entre los niveles de presión sonora SPL medidos, con y sin material absorbente al interior de la bocina exponencial de Salmon²⁵.

Fuente: propia

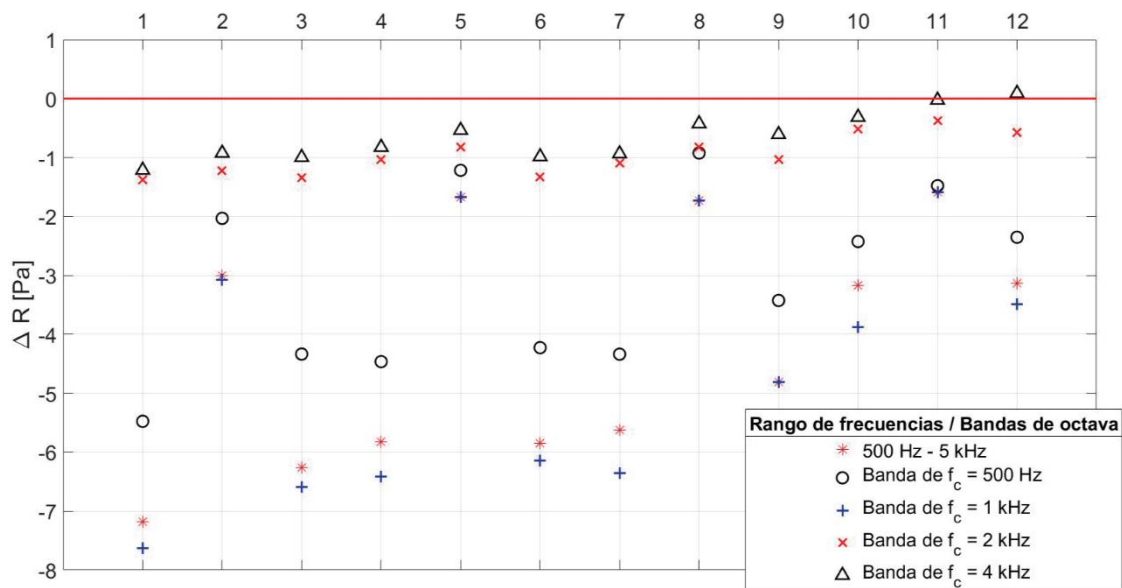
²⁵ Cada marcador indica la reducción del SPL obtenida en el rango de frecuencias, y en cada banda de octava.

Figura E-6: Diferencia Δ entre las desviaciones estándar DE obtenidas con y sin material absorbente al interior de la bocina exponencial de Salmon.



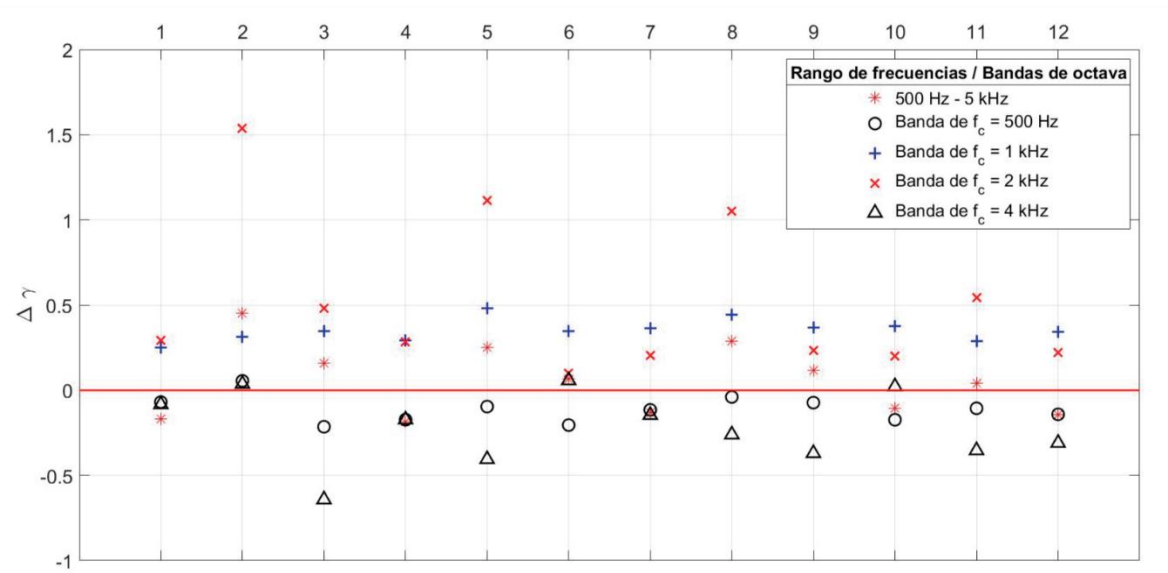
Fuente: propia

Figura E-7: Diferencia Δ entre el rango R obtenido, con y sin material absorbente implementado al interior de la bocina exponencial de Salmon



Fuente: propia

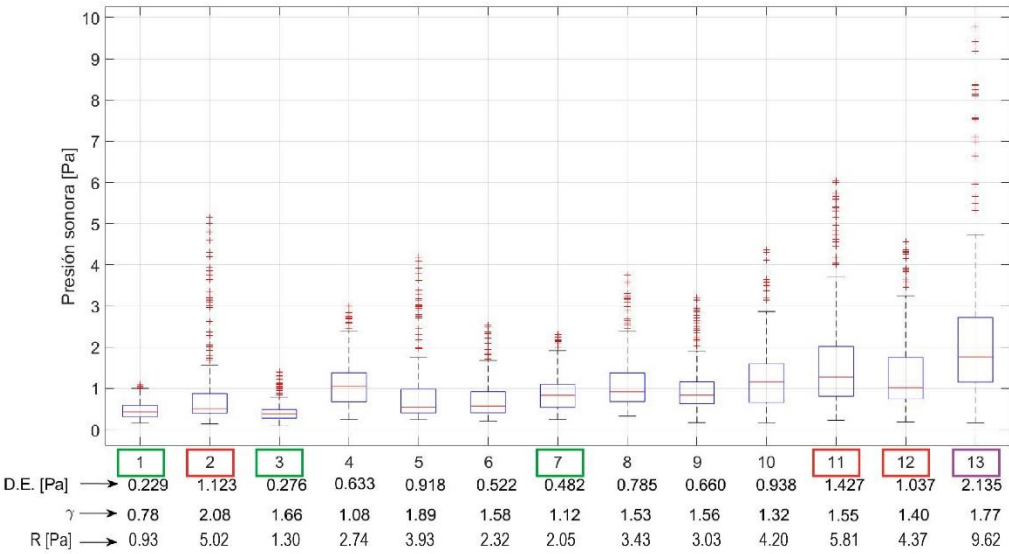
Figura E-8: Diferencia Δ entre el coeficiente de asimetría γ obtenido, con y sin material absorbente implementado al interior de la bocina exponencial de Salmon



Fuente: propia

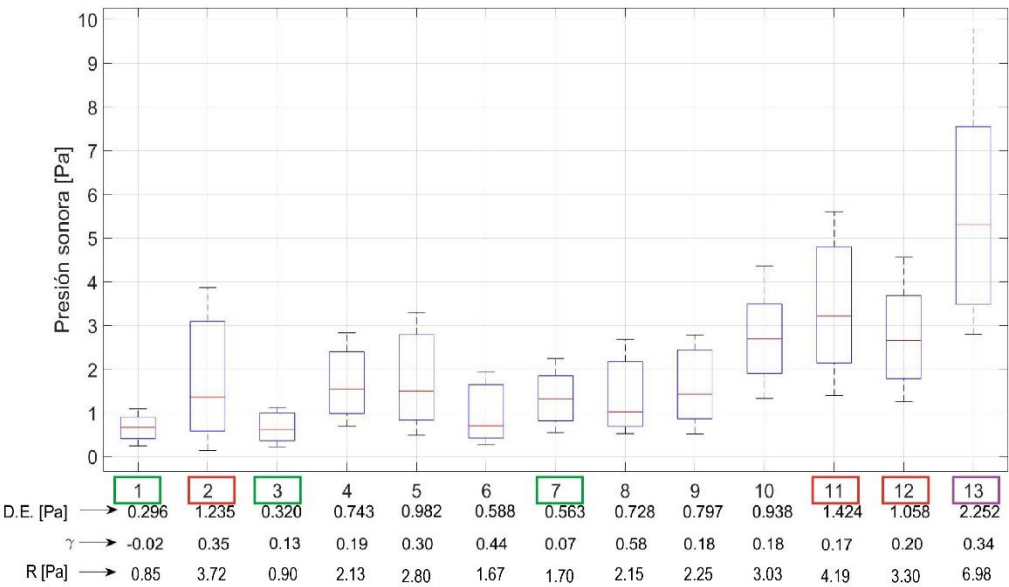
Bocina exponencial rectangular

Figura E-9: Diagrama de cajas de las RF obtenidas con la bocina exponencial rectangular, calculado desde 500 Hz hasta 5 kHz.



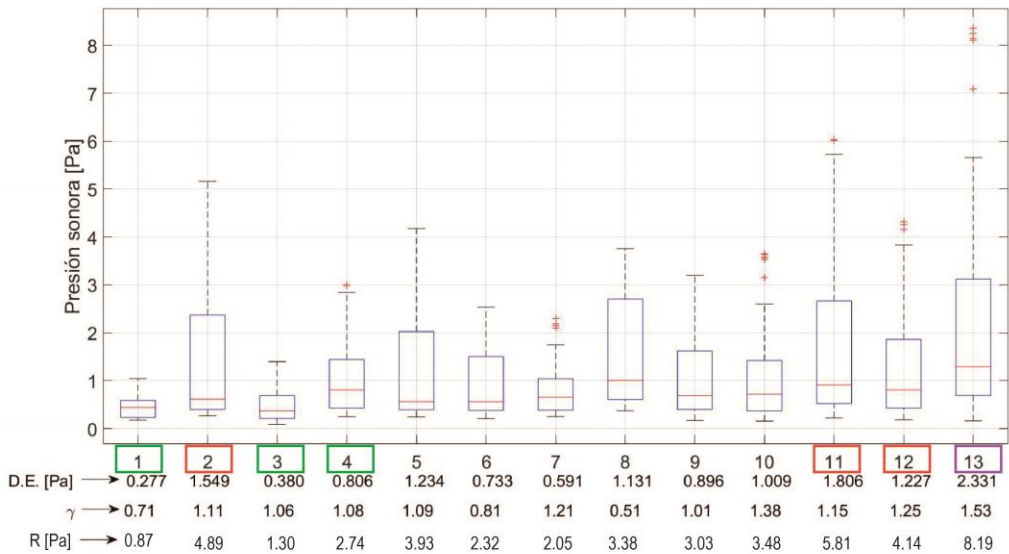
Fuente: propia

Figura E-10: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 500\text{ Hz}$.

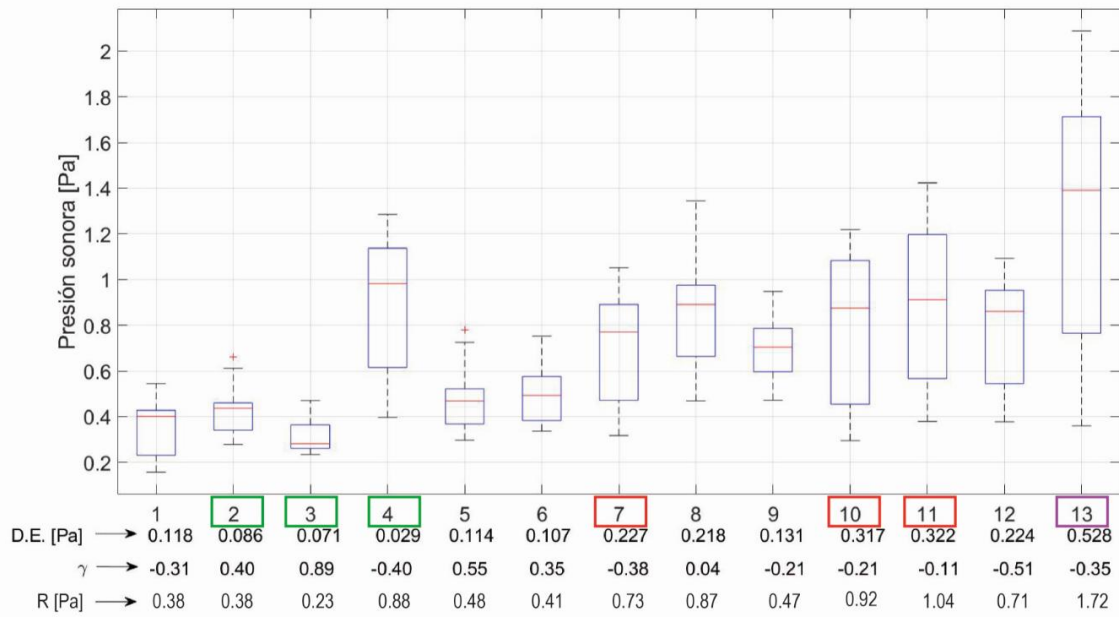


Fuente: propia

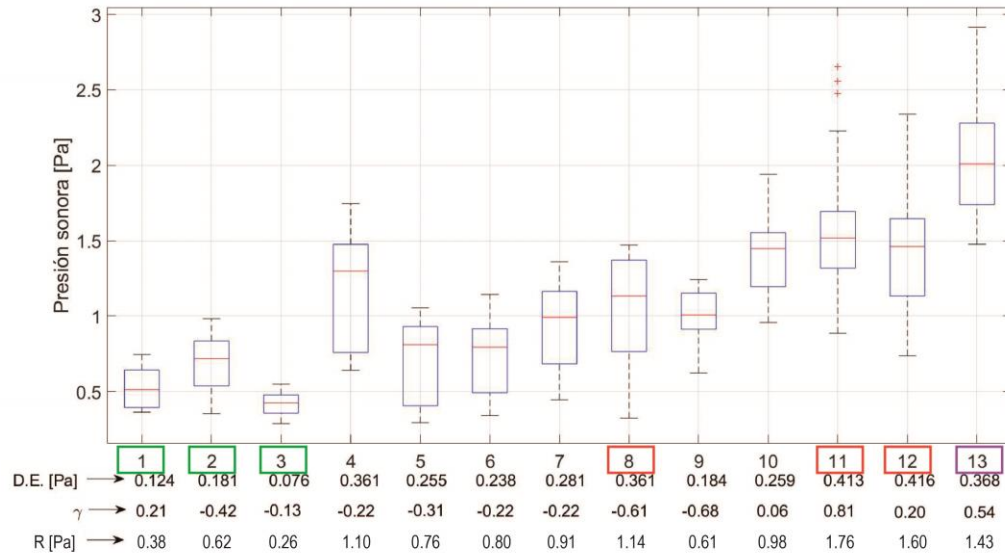
Figura E-11: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 1000\text{ Hz}$.



Fuente: propia

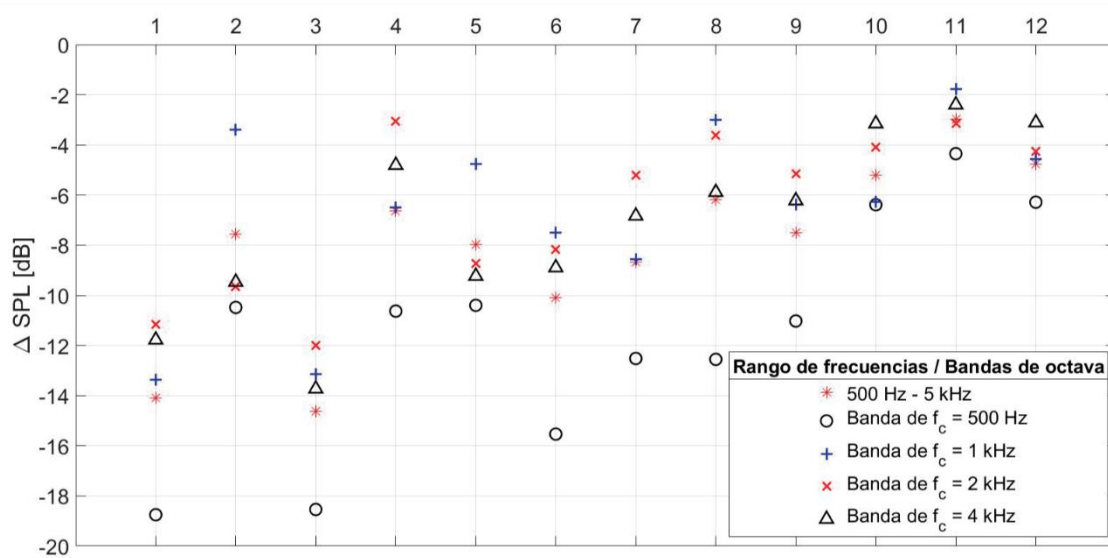
Figura E-12: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 2000 \text{ Hz}$.

Fuente: propia

Figura E-13: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 4000 \text{ Hz}$.

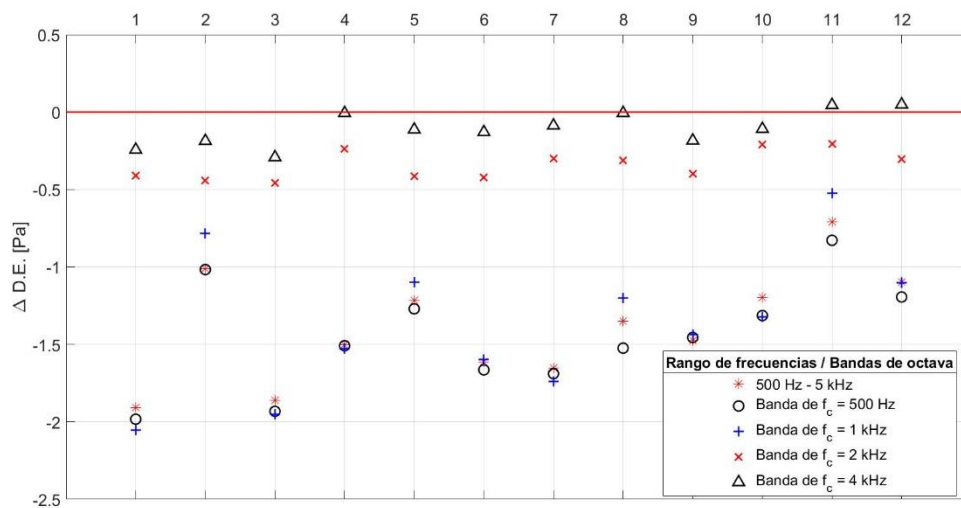
Fuente: propia

Figura E-14: Diferencia Δ entre los niveles de presión sonora SPL medidos, con y sin material absorbente al interior de la bocina exponencial rectangular.



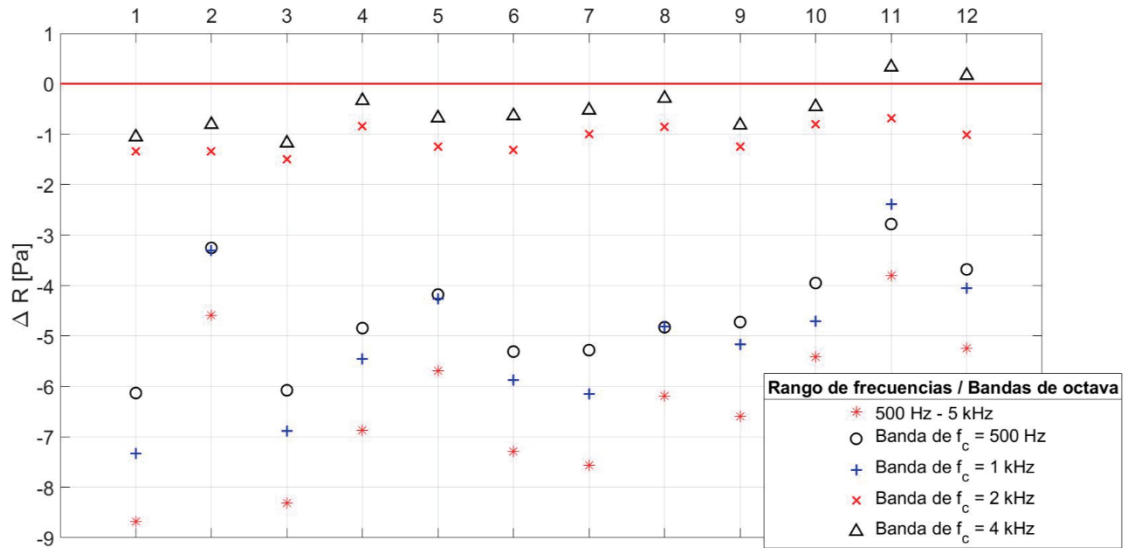
Fuente: propia

Figura E-15: Diferencia Δ entre las desviaciones estándar DE obtenidas, con y sin material absorbente al interior de la bocina exponencial rectangular.



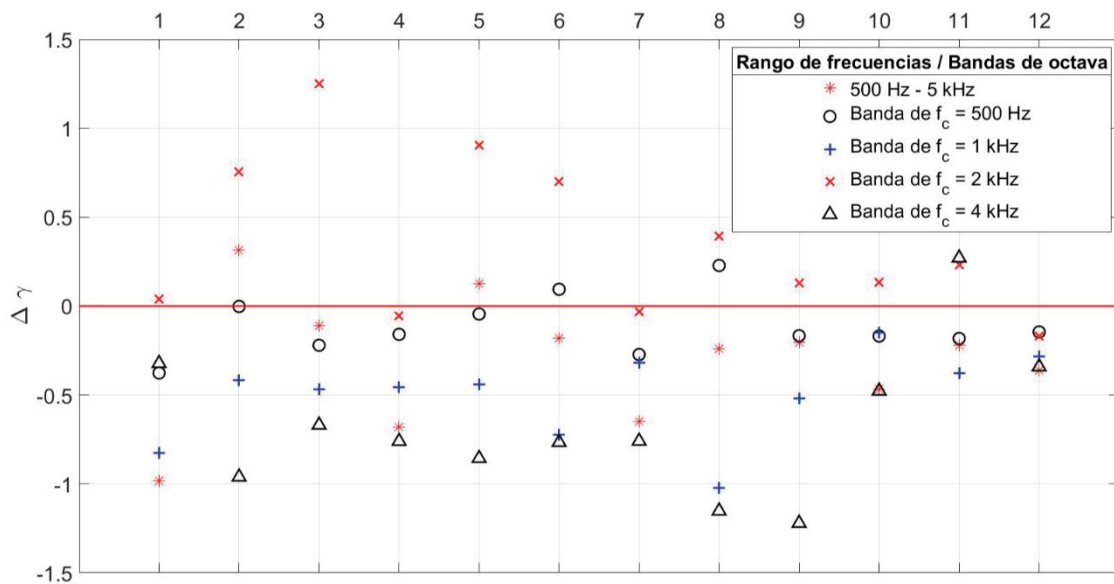
Fuente: propia

Figura E-16: Diferencia Δ entre el rango R registrado, con y sin material absorbente al interior de la bocina exponencial rectangular.



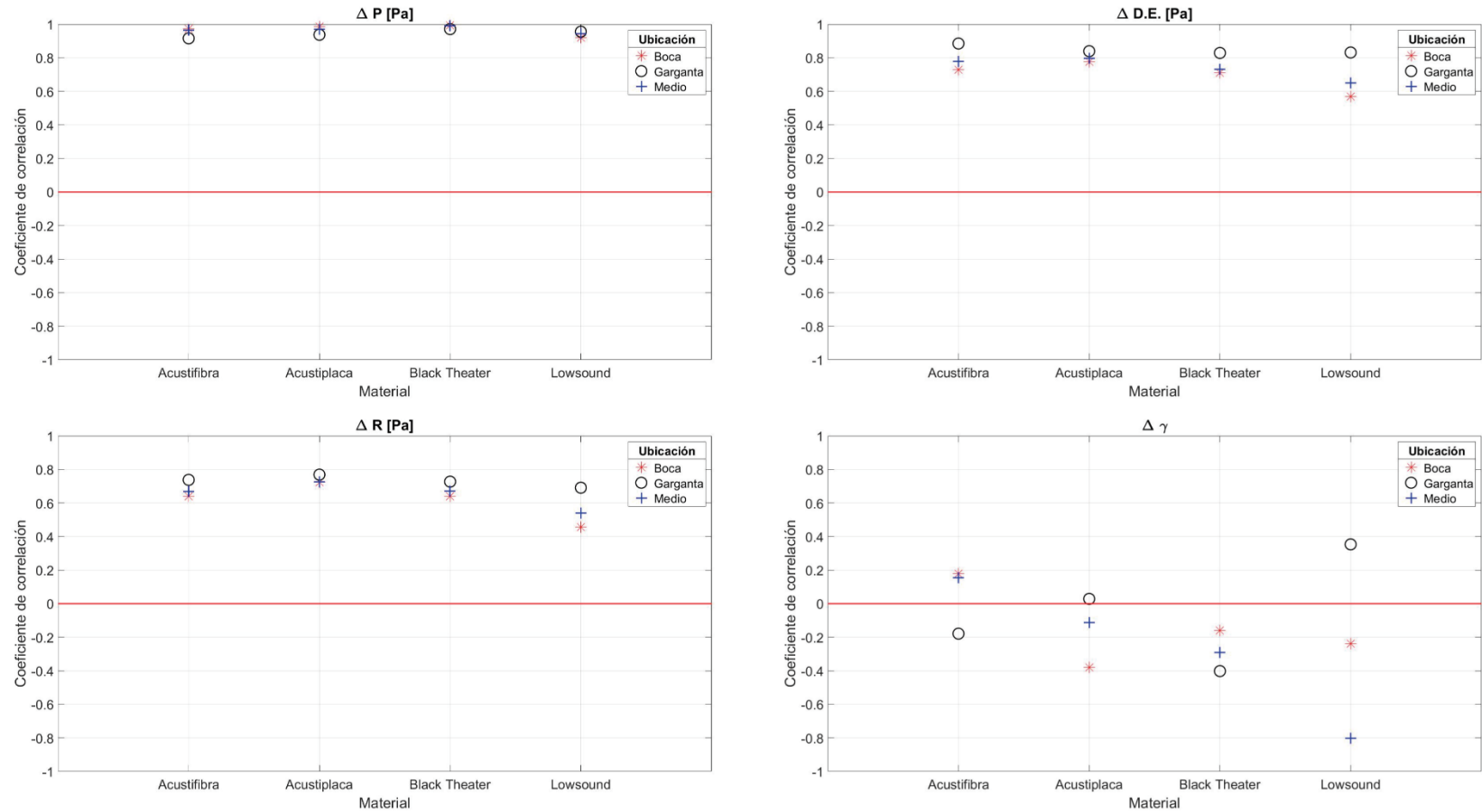
Fuente: propia

Figura E-17: Diferencia Δ entre el coeficiente de asimetría γ obtenido, con y sin material absorbente al interior de la bocina exponencial rectangular.



Fuente: propia

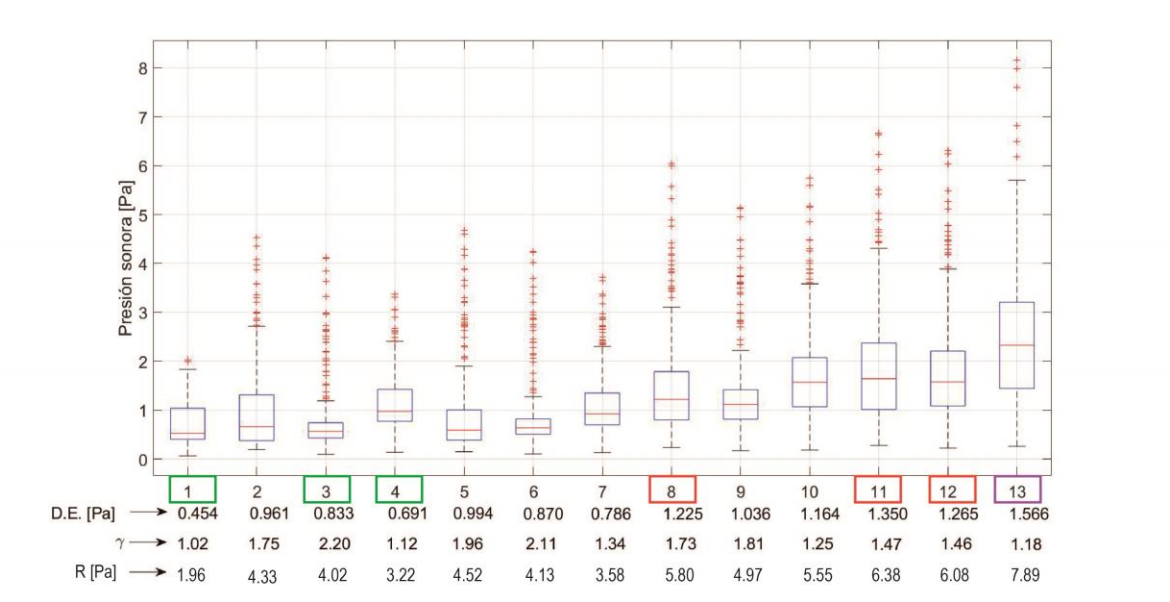
Figura E-18: Coeficiente de correlación r calculado entre el coeficiente de absorción α y las variables que representan el comportamiento de la RF: la diferencia de presión sonora ΔP , la desviación estándar ΔDE , el rango ΔR y el coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$, de la bocina exponencial rectangular.



Fuente: propia

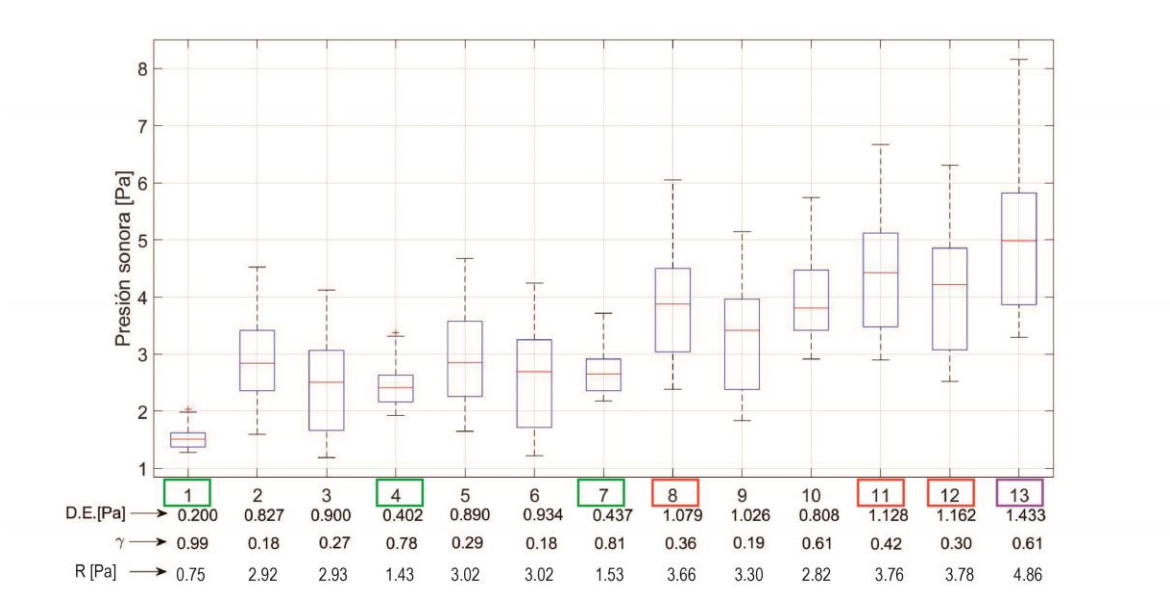
Bocina cónica

Figura E-19: Diagrama de cajas de las RF obtenidas con la bocina cónica calculado desde 500 Hz hasta 5 kHz.



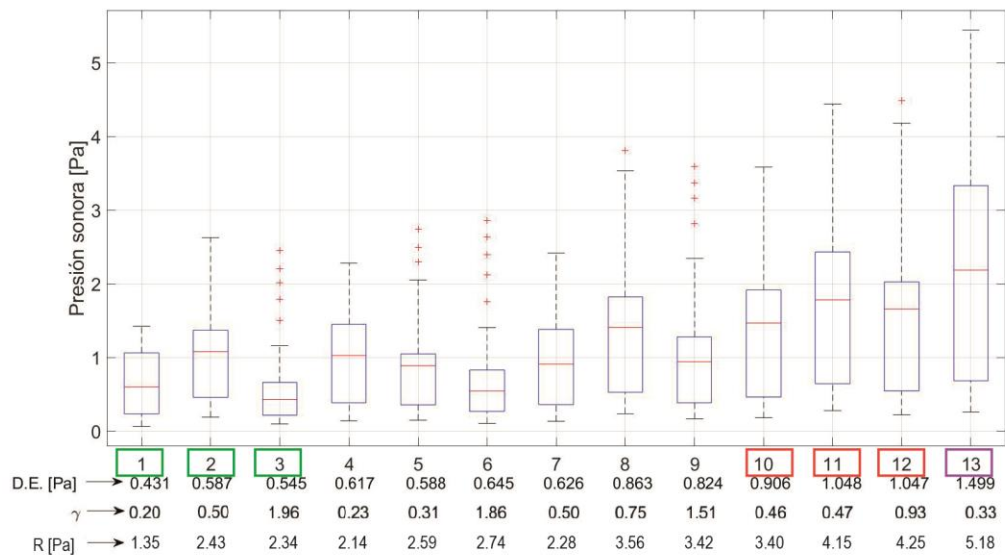
Fuente: propia

Figura E-20: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 500$ Hz.



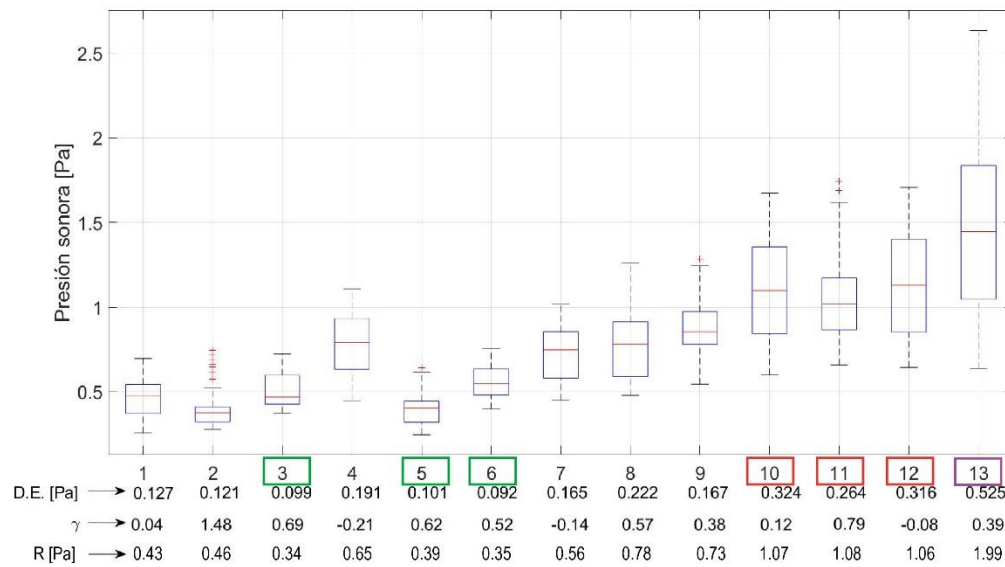
Fuente: propia

Figura E-21: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 1000\text{ Hz}$.

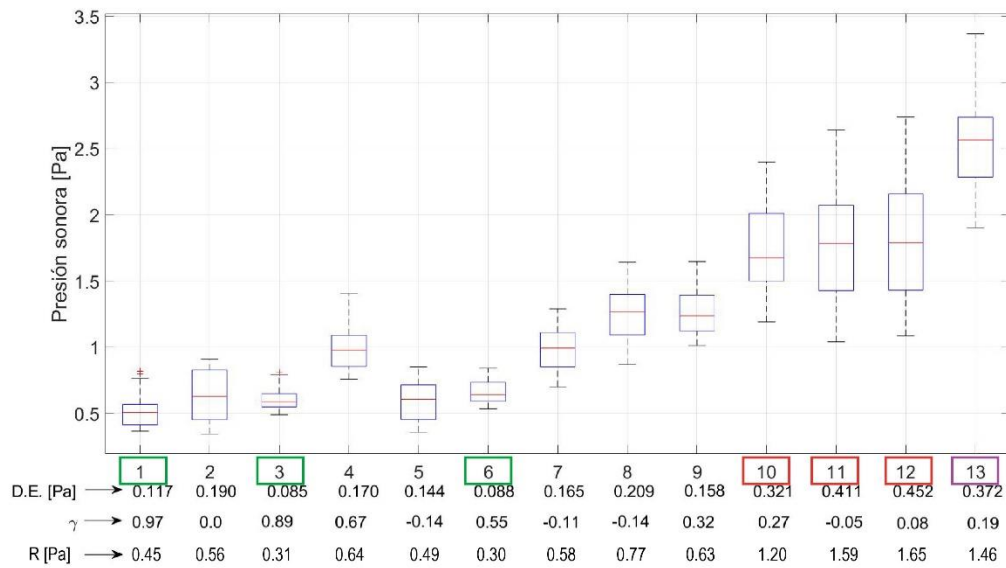


Fuente: propia

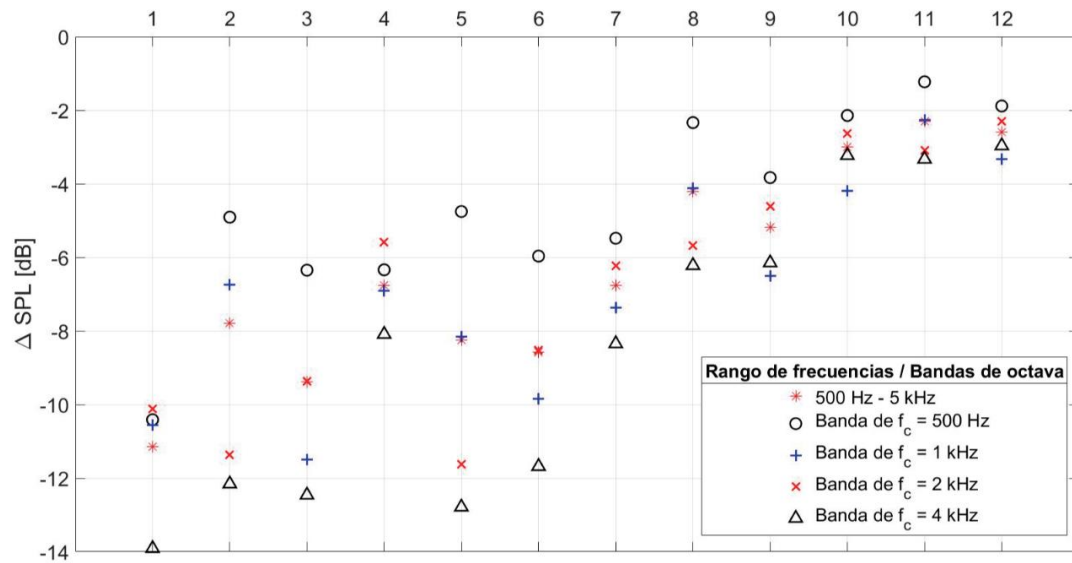
Figura E-22: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 2000\text{ Hz}$.



Fuente: propia

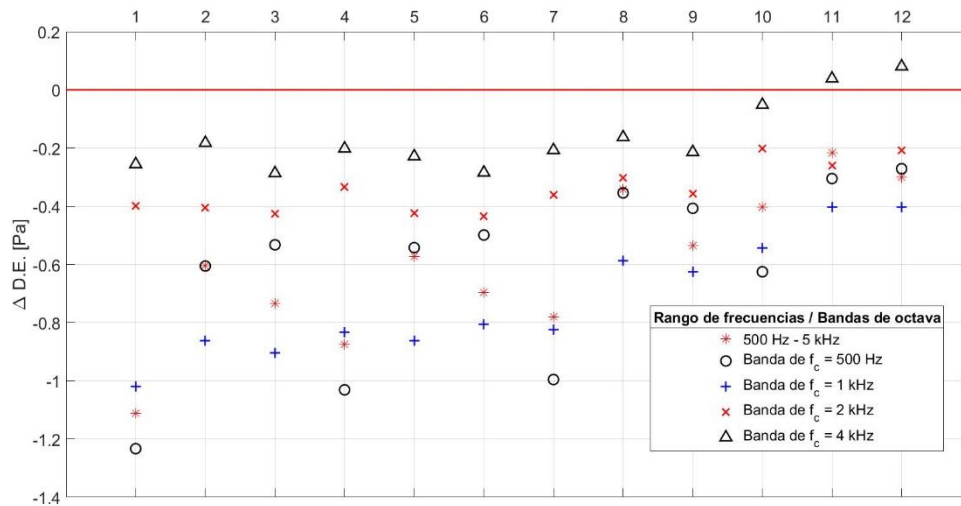
Figura E-23: Diagrama de caja de la RF obtenida en la banda de octava, con $f_c = 4000 \text{ Hz}$.

Fuente: propia

Figura E-24: Diferencia Δ entre los niveles de presión sonora SPL medidos, con y sin material absorbente al interior de la bocina cónica.

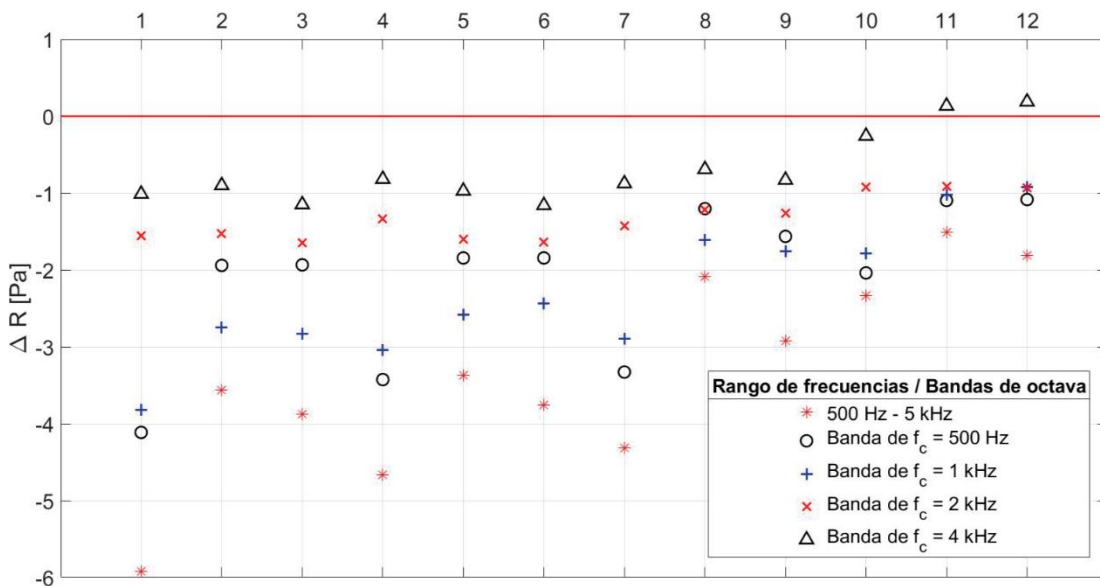
Fuente: propia

Figura E-25: Diferencia Δ entre las desviaciones estándar DE obtenidas, con y sin material absorbente al interior de la bocina cónica.



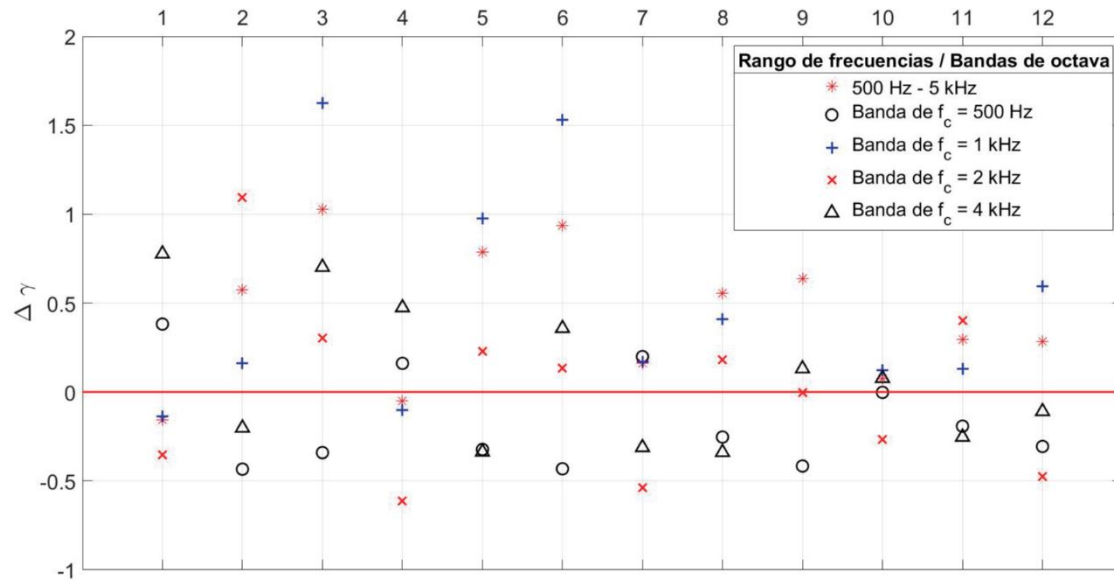
Fuente: propia

Figura E-26: Diferencia Δ entre el rango R registrado, con y sin material absorbente al interior de la bocina cónica.



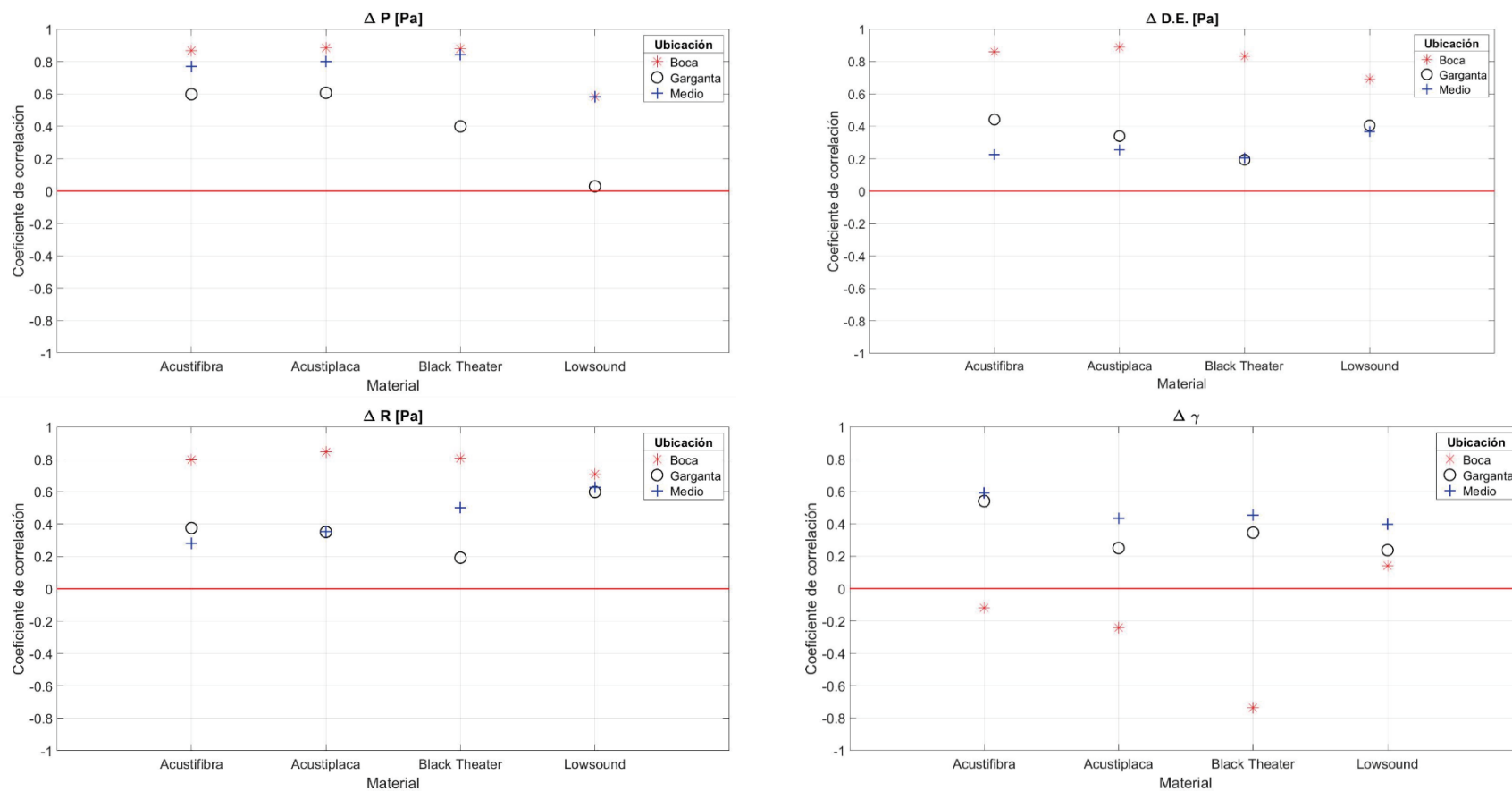
Fuente: propia

Figura E-27: Diferencia Δ entre el coeficiente de asimetría γ obtenido, con y sin material absorbente al interior de la bocina cónica.



Fuente: propia

Figura E-28: Coeficiente de correlación r calculado entre el coeficiente de absorción α y las variables que representan el comportamiento de la RF: la diferencia de presión sonora ΔP , la desviación estándar ΔDE , el rango ΔR y el coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$, de la bocina cónica.



Fuente: propia

F. Anexo: resultados del análisis de la varianza ANOVA

El análisis de la varianza ANOVA es una técnica útil para probar la hipótesis de si las medias aritméticas, de un número k de muestras, son iguales o, si de lo contrario, difieren por el efecto de un tratamiento aplicado. En esta investigación, las muestras y el tratamiento resultan siendo las respuestas en frecuencia y el material absorbente implementado, respectivamente.

Considerando las diferencias de la presión acústica promedio Δp , de la desviación estándar DE , del rango ΔR y del coeficiente de asimetría $\Delta \gamma$, en las RF provocadas por la implementación del material absorbente, el análisis de la varianza se aplicó con el fin de determinar si cada uno de los materiales absorbentes producen efectos que difieren significativamente la respuesta en frecuencia, respecto a los demás materiales y a lo medido sin material. Igualmente, con las diferencias $\Delta p, \Delta C_v, \Delta R$ y $\Delta \gamma$ observadas con cada material absorbente ubicado en las tres posiciones al interior de las bocinas establecidas, se implementa el ANOVA con el objetivo de evaluar si el efecto, en la respuesta en frecuencia, difiere significativamente por la ubicación de los materiales.

Cuando los tratamientos, es decir, la implementación de diferentes materiales absorbentes, producen efectos similares, se aprueba la hipótesis H_o , descrita en la expresión De lo contrario, se rechaza dicha hipótesis y se confirma una nueva hipótesis H_A , de la ecuación, donde se deduce que, por lo menos, uno de los k tratamientos tiene una media μ significativamente diferente respecto a las medias de los tratamientos restantes.

Con el ANOVA, se logra separar la variación total observada en cada una de las fuentes que contribuye a la misma (Gutiérrez & de la Vara, 2012). Es decir, es posible diferenciar la variabilidad causada por el tratamiento y la producida por el error. Si la variación producida por el tratamiento predomina sobre la generada por el error, se demuestra que el tratamiento, o la implementación de los materiales absorbentes, tienen efecto en la RF de la bocina. En este caso, las medias aritméticas

de la variación dada por el tratamiento y por el error son diferentes. De lo contrario, cuando los tratamientos no predominan, dichas medias resultan siendo iguales.

La suma de los cuadrados SC representa la variación total de la muestra, siendo igual a la suma de la variación por el tratamiento SC_{TRAT} y a la variación por el error SC_E . Los grados de libertad df de la suma de cuadrados total, resulta siendo igual a $N - 1$, donde N representan todas las frecuencias medidas en todos los tratamientos. Los df de los tratamientos son iguales a $k - 1$, y del error son equivalentes a $N - k$. La media de la varianza CM , como se describe en la expresión (E.1), tanto para el tratamiento como para el error, es igual a la división entre la suma de cuadrados y los grados de libertad, respectivos.

$$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k-1} \text{ y } CM_E = \frac{SC_E}{N-k} \quad (E.1)$$

$$F_o = \frac{CM_{TRAT}}{CM_E} \quad (E.2)$$

Con el estadístico F_o , que corresponde con la ecuación (E.4), el cual depende de los grados de libertad los tratamientos ($k - 1$), en el numerador, y del error, en el denominador ($N - k$), se determina si la hipótesis H_o se rechaza o se acepta.

Con el *valor - P*, que representa el área bajo la distribución $F_{\alpha, k-1, N-k}$, a la derecha de F_o , la hipótesis puede ser rechazada o aceptada. Si el *valor - P* $< \alpha$, la hipótesis H_o se rechaza. De lo contrario, se acepta (Gutiérrez & de la Vara, 2012).

Los resultados del ANOVA, mostrados a continuación, se interpretaron teniendo en cuenta un nivel de significancia $\alpha = 0.05$. Luego, se realiza la comparación múltiple de las RF con el método de *Tukey - Kramer*, con el fin de determinar con cuál material absorbente y con cuál ubicación se produce la diferencia significativa en las RF. Se efectuó la prueba de Levene para corroborar si las varianzas de las RF son homogéneas. Estos cálculos se efectuaron en el software MATLAB.

Bocina exponencial de Salmon.

Tabla F-1: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
0.294	4, 800	0.8819

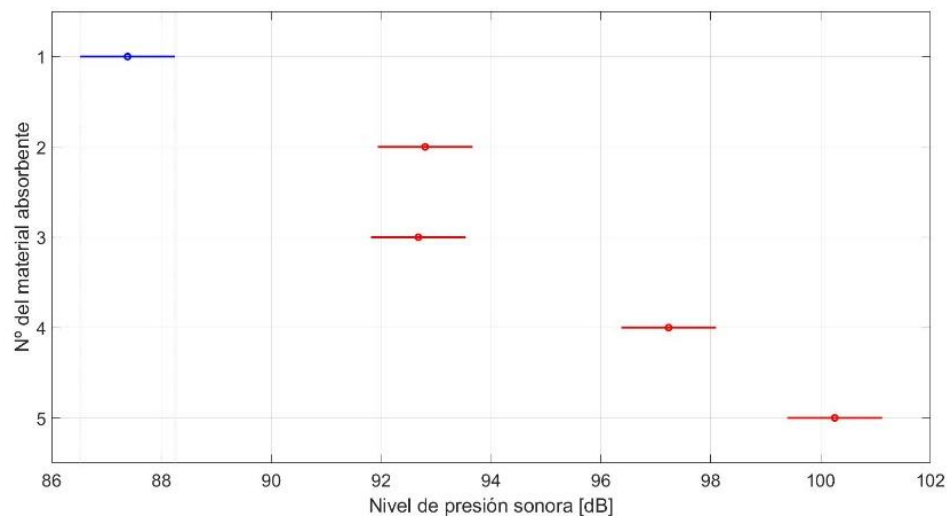
Fuente: propia

Tabla F-2: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	15546	4	3886.5	120.77	0.000
Error	25745.7	800	32.18		
Total	41291.7	804			

Fuente: propia

Figura F-1: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente ($Error\ estándar = 0.44\ dB$)²⁶.



Fuente: propia

²⁶ Los números del eje Y de la respectiva Figura, representan el siguiente material absorbente: 1, Acustifibra; 2, Acustiplaca; 3, Black Theater; 4, Lowsound; 5, sin material.

Tabla F-3: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente.

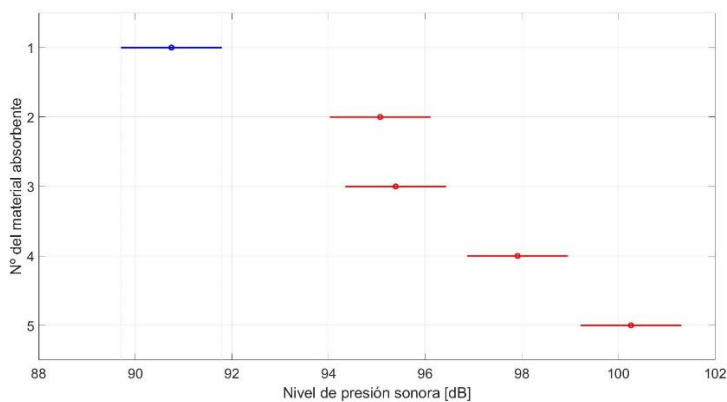
Estadístico de Levene	df	Valor-P
3.407	4, 800	0.0089

Fuente: propia

Tabla F-4: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	8134.6	4	2033.64	43.26	0.000
Error	37611.5	800	47.01		
Total	45746.1	804			

Fuente: propia

Figura F-2: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente (*Error estándar* = 0.54 dB).

Fuente: propia

Tabla F-5: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes en la mitad, y sin material absorbente.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
0.2489	4, 800	0.9104

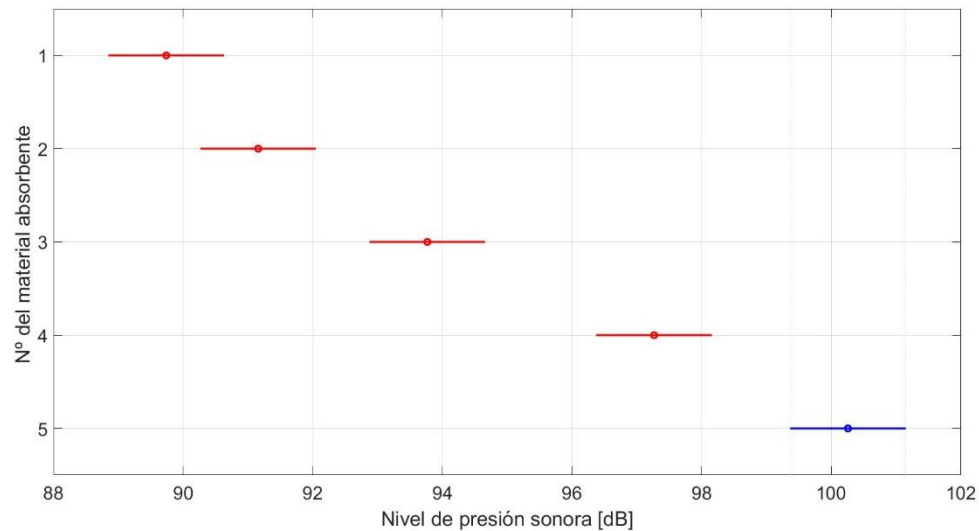
Fuente: propia

Tabla F-6: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes ubicados en la mitad, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	12096.3	4	3024.07	87.91	0.000
Error	27518.4	800	34.4		
Total	39614.7	804			

Fuente: propia

Figura F-3: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre ubicados en la mitad, y sin material absorbente (*Error estándar* = 0.46 dB).



Fuente: propia

Tabla F-7: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones.

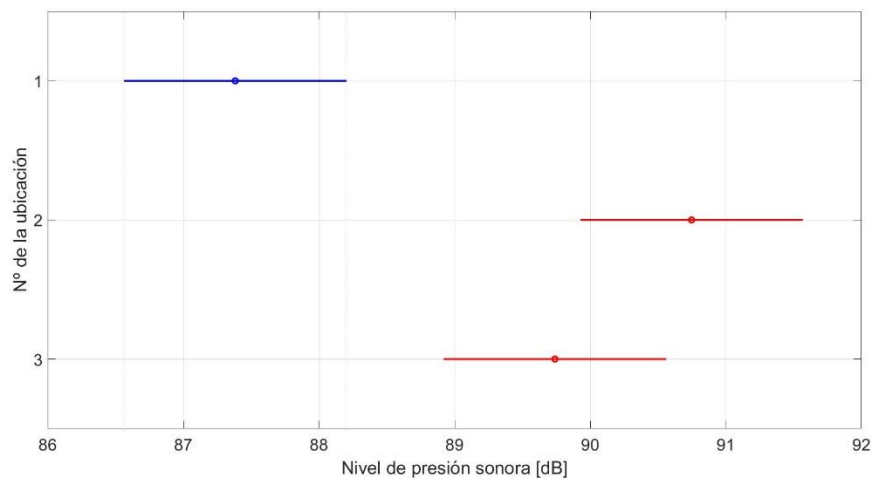
Estadístico de Levene	df	Valor-P
10.283	2, 480	0

Fuente: propia

Tabla F-8: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	960.3	2	480.159	12.18	0.000
Error	18919.7	480	39.416		
19880	432.40	482			

Fuente: propia

Figura F-4: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones ($Error\ estándar = 0.49\ dB$)²⁷.

Fuente: propia

Tabla F-9: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
8.6085	2, 480	0.0002

Fuente: propia

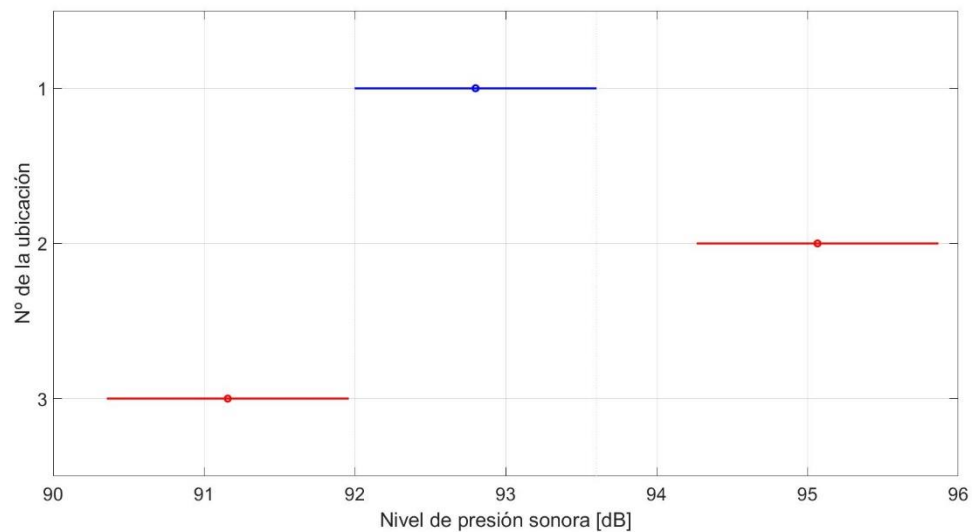
²⁷ Los números del eje Y de la respectiva Figura, representan las siguientes ubicaciones del material: 1, Boca; 2, Garganta; 3, Medio.

Tabla F-10: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	<i>df</i>	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	1240.6	2	620.311	16.46	0.000
Error	18085.2	480	37.678		
Total	19325.9	482			

Fuente: propia

Figura F-5: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.48 dB).



Fuente: propia

Tabla F-11: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones.

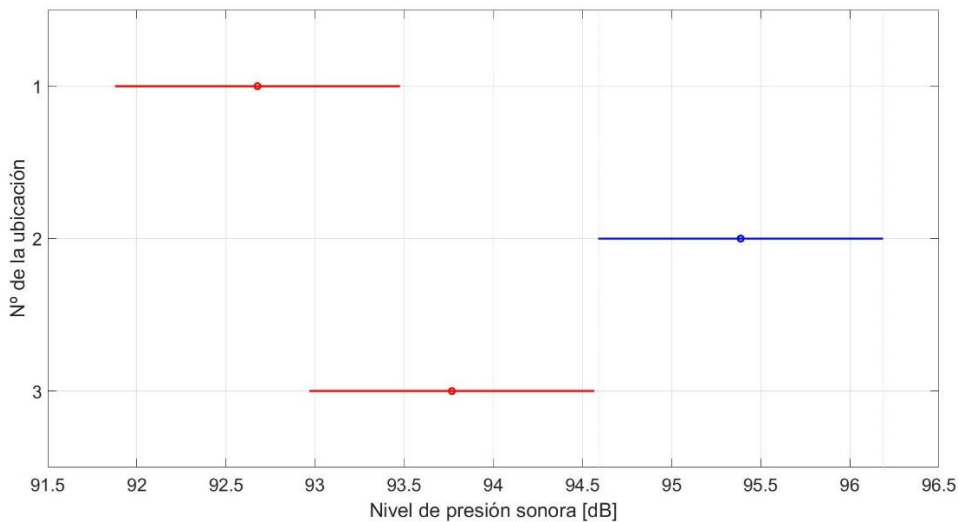
Estadístico de Levene	<i>df</i>	Valor-P
5.335	2, 480	0.0051

Fuente: propia

Tabla F-12: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	599	2	299.48	8.01	0.0004
Error	17956.2	480	37.409		
Total	18555.1	482			

Fuente: propia

Figura F-6: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.48 dB).

Fuente: propia

Tabla F-13: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
1.0625	2, 480	0.3464

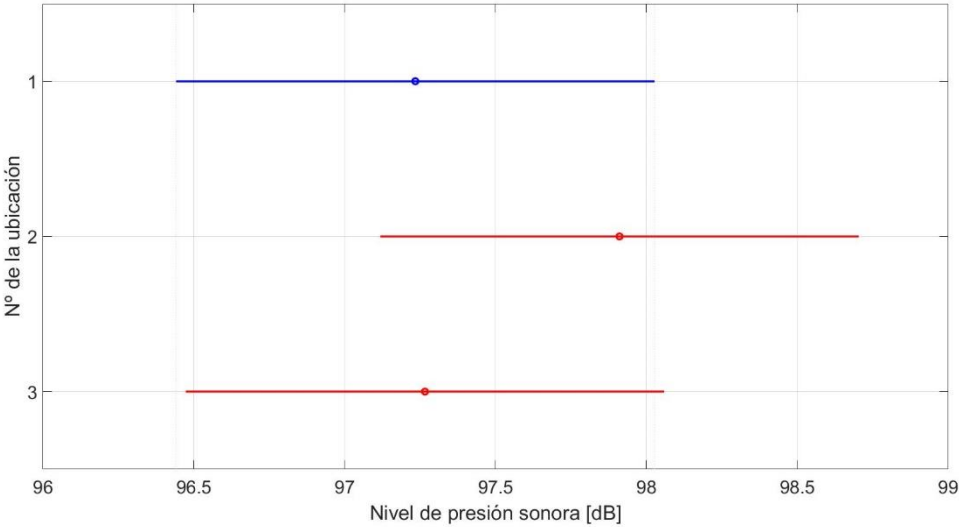
Fuente: propia

Tabla F-14: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	46.9	2	23.47	0.64	0.529
Error	17688.1	480	36.85		
Total	17735	482			

Fuente: propia

Figura F-7: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.47 dB).



Fuente: propia

Bocina exponencial rectangular

Tabla F-15: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente.

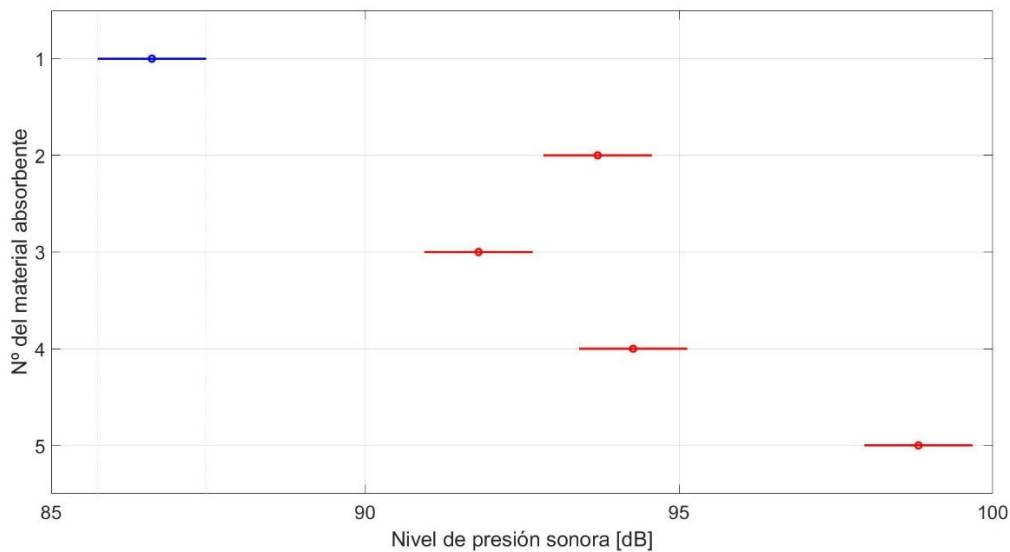
Estadístico de Levene	df	Valor-P
9.507	4, 800	0

Fuente: propia

Tabla F-16: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	12599.3	4	3149.83	97.65	0.000
Error	25805.7	800	32.26		
Total	38405	804			

Fuente: propia

Figura F-8: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente (*Error estándar* = 0.44 dB).

Fuente: propia

Tabla F-17: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
4.0148	4, 800	0.0031

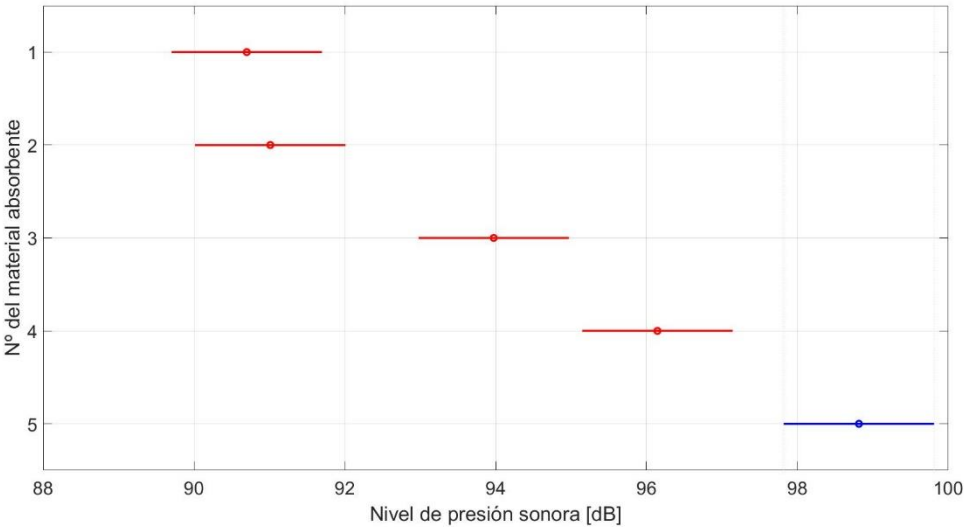
Fuente: propia

Tabla F-18: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	7650.3	4	1912.57	44.49	0.000
Error	34392.4	800	42.99		
Total	42042.7	804			

Fuente: propia

Figura F-9: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente (*Error estándar* = 0.51 dB).



Fuente: propia

Tabla F-19: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes en la mitad, y sin material absorbente.

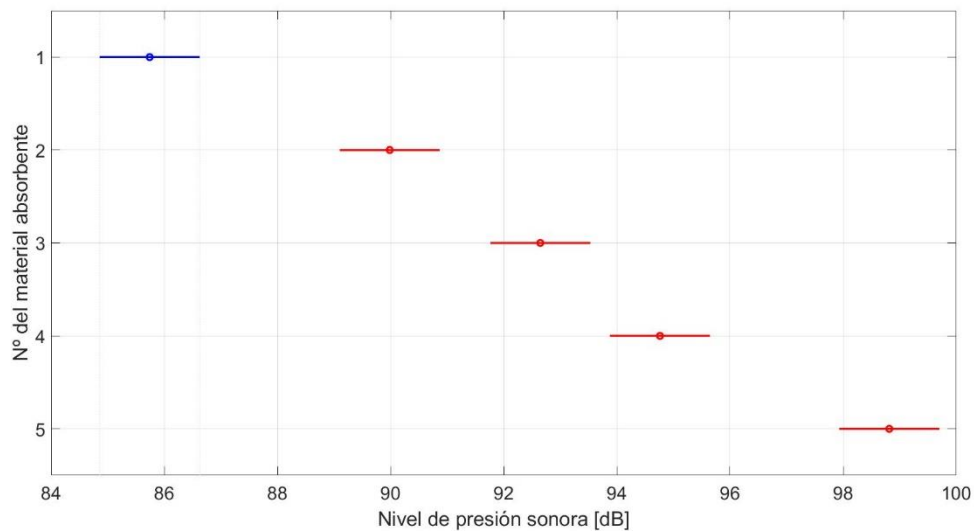
Estadístico de Levene	df	Valor-P
6.7162	4, 800	0

Fuente: propia

Tabla F-20: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes ubicados en la mitad, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	15609.4	4	3902.35	115.36	0.000
Error	27063.1	800	33.83		
Total	42672.5	804			

Fuente: propia

Figura F-10: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre ubicados en la mitad, y sin material absorbente (*Error estándar* = 0.45 dB).

Fuente: propia

Tabla F-21: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
19.992	2, 480	0

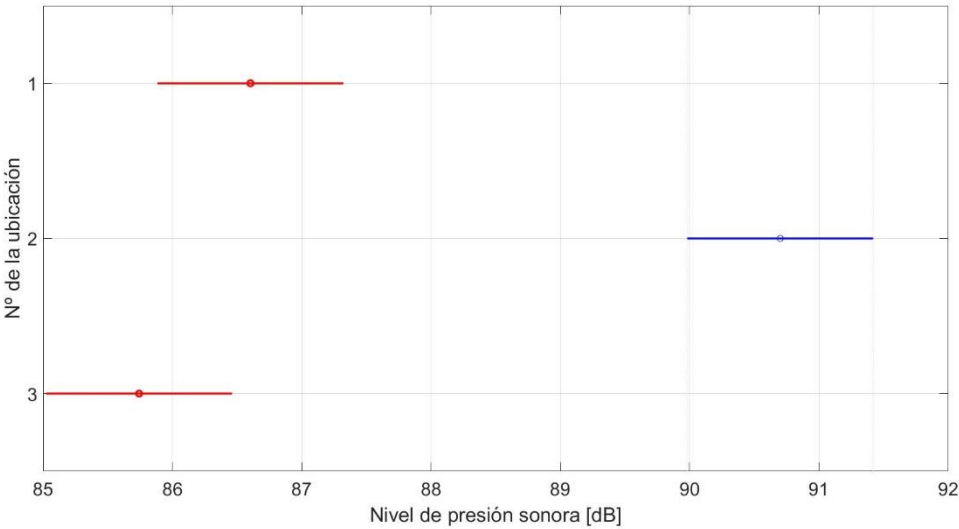
Fuente: propia

Tabla F-22: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	2259.5	2	1129.77	37.29	0.000
Error	14541.3	480	30.29		
Total	16800.8	482			

Fuente: propia

Figura F-11: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.43 dB).



Fuente: propia

Tabla F-23: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
6.7589	2, 480	0.0013

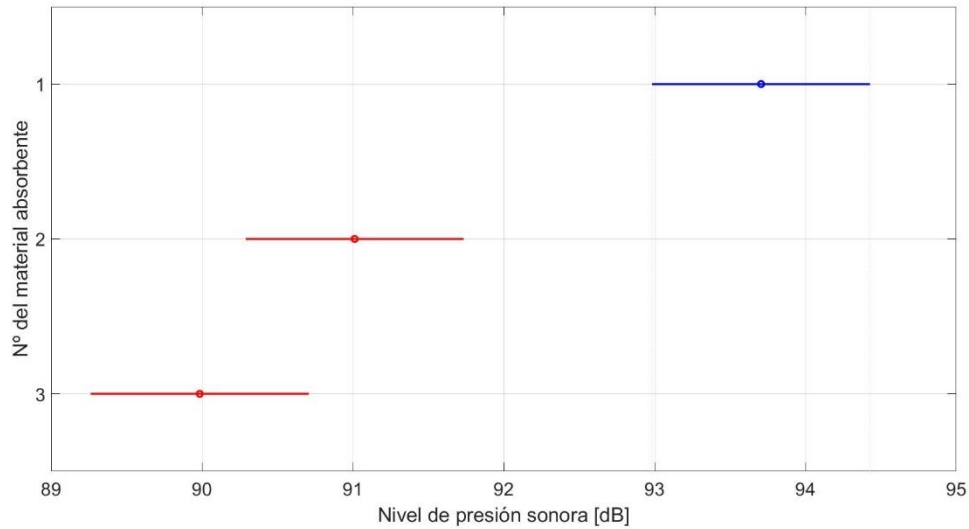
Fuente: propia

Tabla F-24: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	1188.9	2	594.431	19.43	0.000
Error	14682.5	480	30.589		
Total	15871.4	482			

Fuente: propia

Figura F-12: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones (*Error estándar = 0.43 dB*).



Fuente: propia

Tabla F-25: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
0.2107	2, 480	0.8101

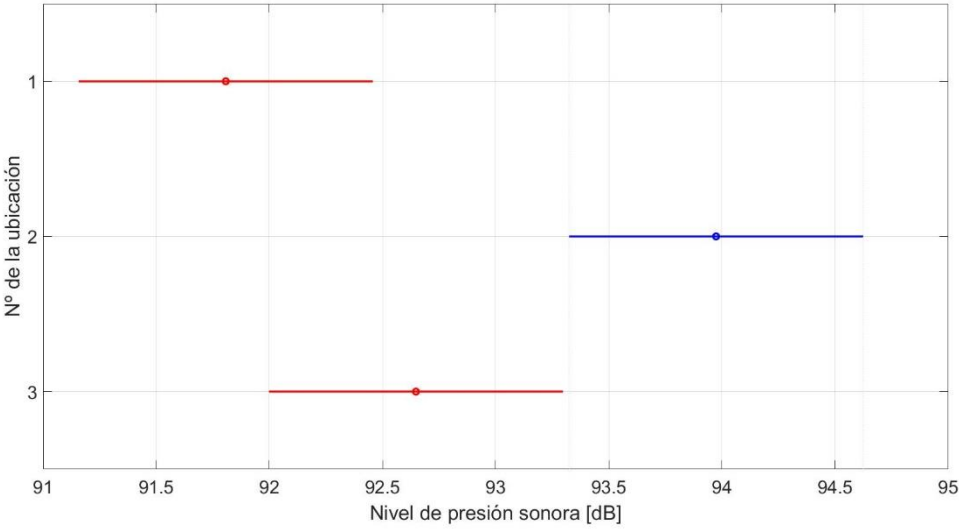
Fuente: propia

Tabla F-26: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	<i>df</i>	CM	<i>F_o</i>	Valor-P
Tratamiento	384.2	2	192.093	7.77	0.0005
Error	11869.5	480	24.728		
Total	12253.7	482			

Fuente: propia

Figura F-13: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.39 dB).



Fuente: propia

Tabla F-25: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	<i>df</i>	Valor-P
0.215	2, 480	0.8067

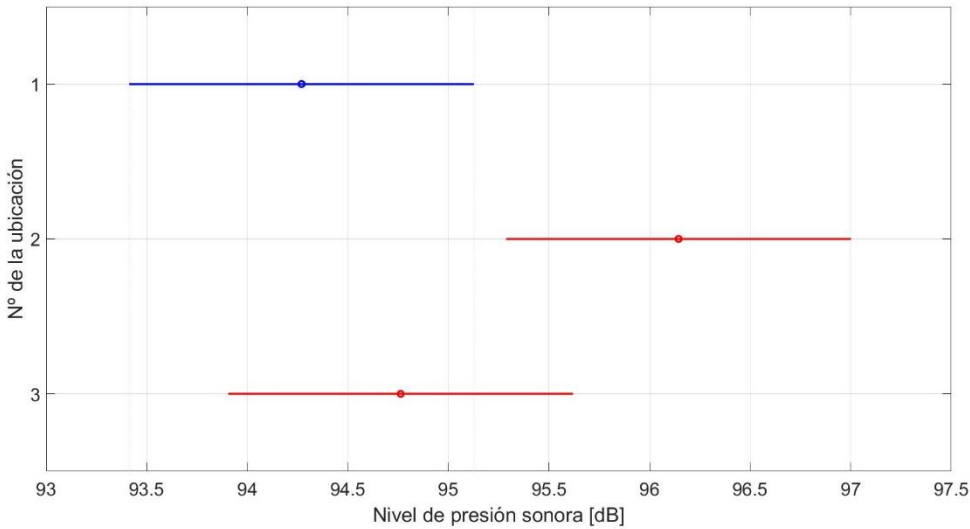
Fuente: propia

Tabla F-26: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	304	2	152.017	3.35	0.03
Error	20664.5	480	43.051		
Total	20968.5	482			

Fuente: propia

Figura F-14: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.51 dB).



Fuente: propia

Bocina cónica

Tabla F-27: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
0.6797	4, 800	0.6062

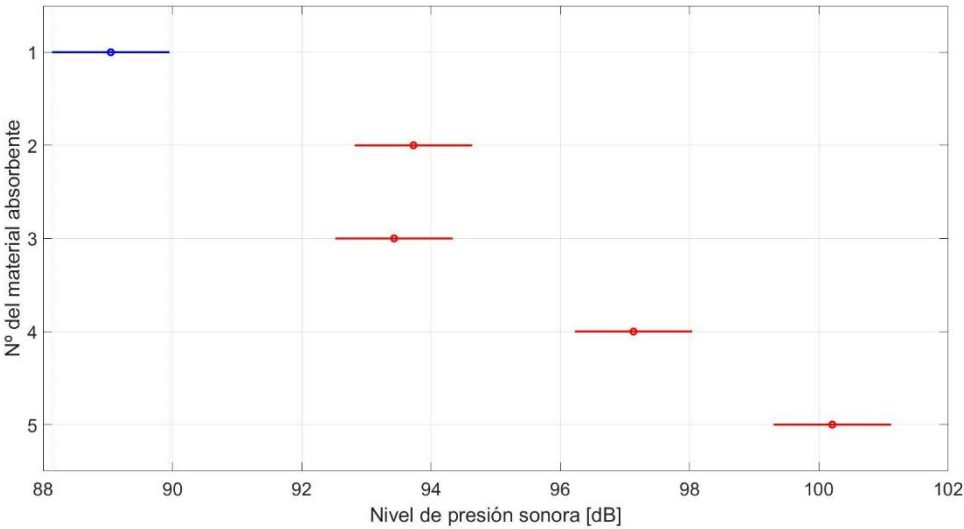
Fuente: propia

Tabla F-28: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	11391.8	4	2847.94	78.87	0.000
Error	28526.4	800	35.66		
Total	39918.1	804			

Fuente: propia

Figura F-15: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre la boca, y sin material absorbente (*Error estándar* = 0.47 dB).



Fuente: propia

Tabla F-29: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
3.2468	4, 800	0.0118

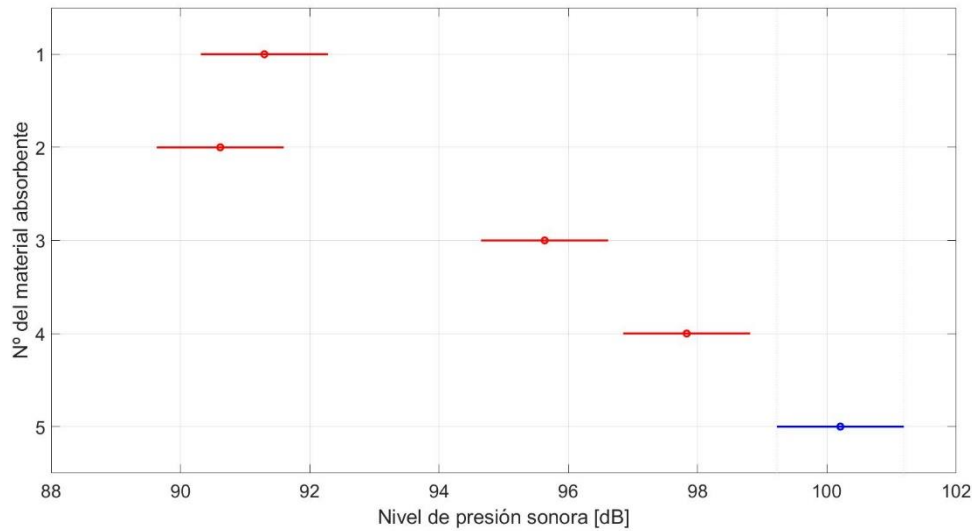
Fuente: propia

Tabla F-30: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	11006.3	4	2751.58	65.92	0.000
Error	33395	800	41.74		
Total	44401.4	804			

Fuente: propia

Figura F-16: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre la garganta, y sin material absorbente (*Error estándar* = 0.50 dB).



Fuente: propia

Tabla F-31: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes en la mitad, y sin material absorbente.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
0.2811	4, 800	0.8903

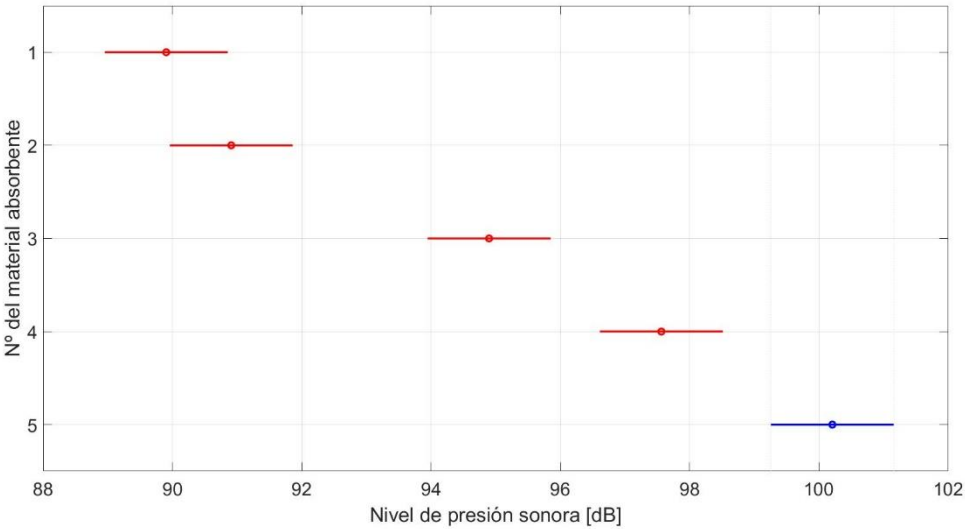
Fuente: propia

Tabla F-32: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con los materiales absorbentes ubicados en la mitad, y sin material absorbente.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	12222.6	4	3055.64	78.2	0.000
Error	31259.7	800	39.07		
Total	43482.3	804			

Fuente: propia

Figura F-17: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con los materiales absorbentes sobre ubicados en la mitad, y sin material absorbente (*Error estándar = 0.50 dB*).



Fuente: propia

Tabla F-33: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones.

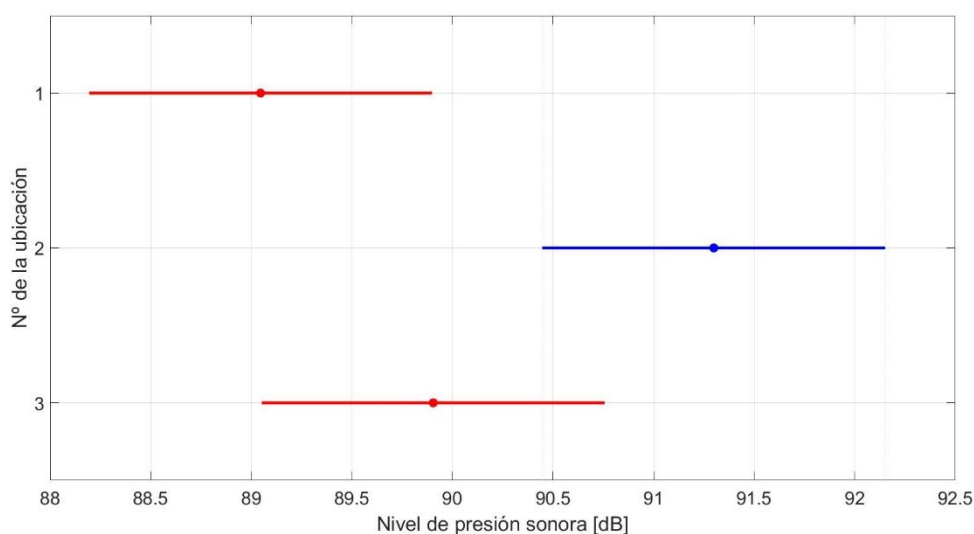
Estadístico de Levene	df	Valor-P
4.7386	2, 480	0.0092

Fuente: propia

Tabla F-34: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F_o	Valor-P
Tratamiento	416.3	2	208.16	4.89	0.0079
Error	20443.1	480	42.59		
Total	20859.4	482			

Fuente: propia

Figura F-18: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la fibra de vidrio “acustifibra” en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.51 dB).

Fuente: propia

Tabla F-35: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
5.859	2, 480	0.0031

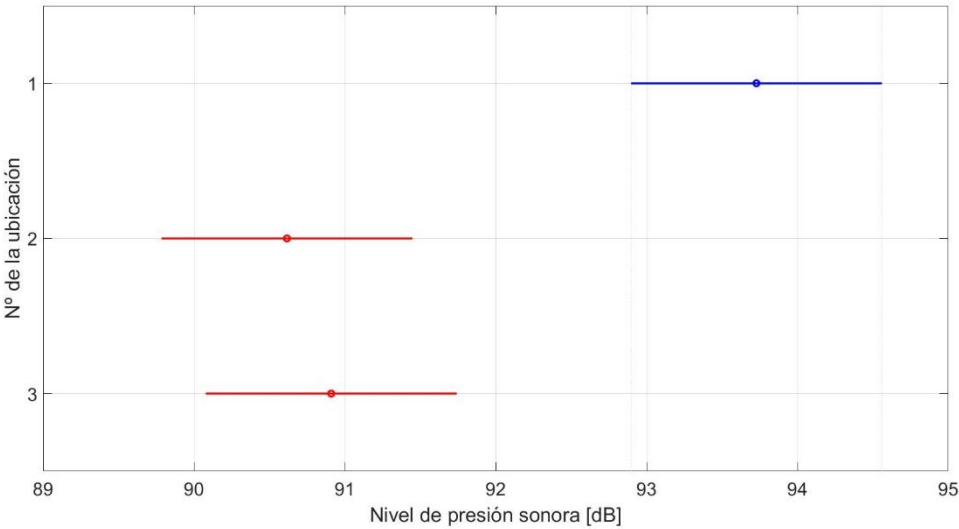
Fuente: propia

Tabla F-36: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	950.7	2	475.372	11.73	0.000
Error	19457.6	480	40.537		
Total	20408.3	482			

Fuente: propia

Figura F-19: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la lana de roca “acustiplaca” en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.50 dB).



Fuente: propia

Tabla F-37: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
0.7866	2, 480	0.456

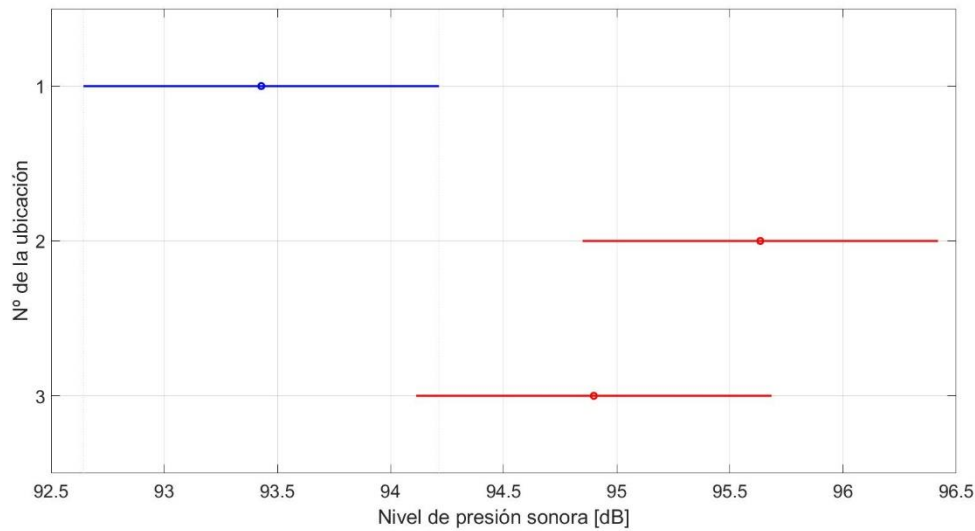
Fuente: propia

Tabla F-38: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	df	CM	F _o	Valor-P
Tratamiento	405.9	2	202.957	5.61	0.0039
Error	17364.9	480	36.177		
Total	17770.9	482			

Fuente: propia

Figura F-20: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la fibra de vidrio *Black Theater* en las tres ubicaciones (*Error estándar = 0.47 dB*).



Fuente: propia

Tabla F-39: Prueba de Levene, de homogeneidad de las varianzas, aplicada con con las respuestas en frecuencia medidas con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones.

Estadístico de Levene	df	Valor-P
0.0622	2, 480	0.9397

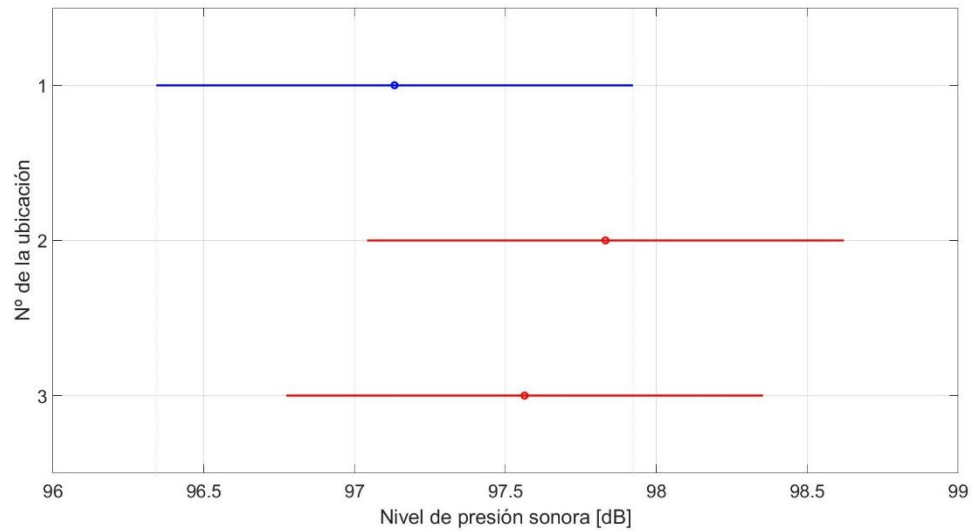
Fuente: propia

Tabla F-40: Resultados del ANOVA determinado con las respuestas en frecuencia medidas con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones.

Fuente	SC	<i>df</i>	CM	<i>F_o</i>	Valor-P
Tratamiento	40.1	2	20.057	0.55	0.578
Error	17557.8	480	36.5788		
Total	17597.9	482			

Fuente: propia

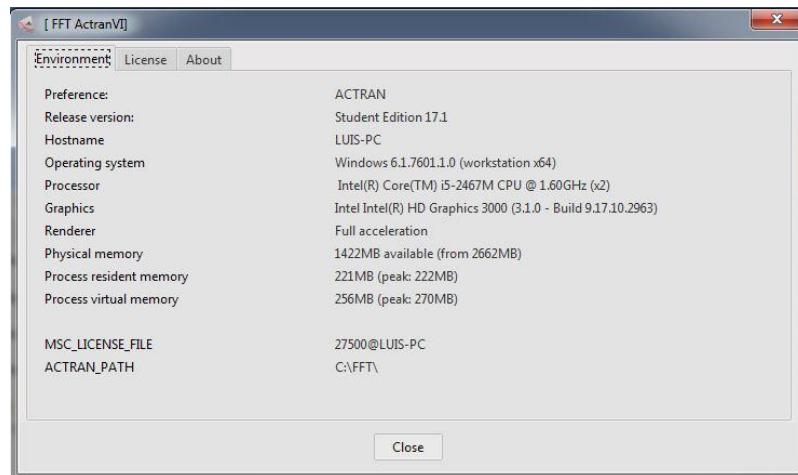
Figura F-21: Comparación múltiple de las respuestas en frecuencia medidas, con la espuma de poliuretano *Lowsound* en las tres ubicaciones (*Error estándar* = 0.47 dB).



Fuente: propia

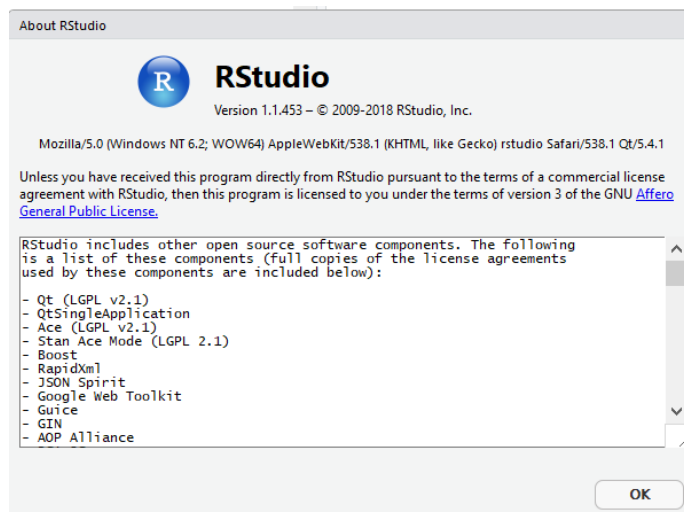
G. Anexo: licencia de los programas

Figura G-1: Licencia de la versión estudiantil ACTRAN VI 17.1.



Fuente: propia

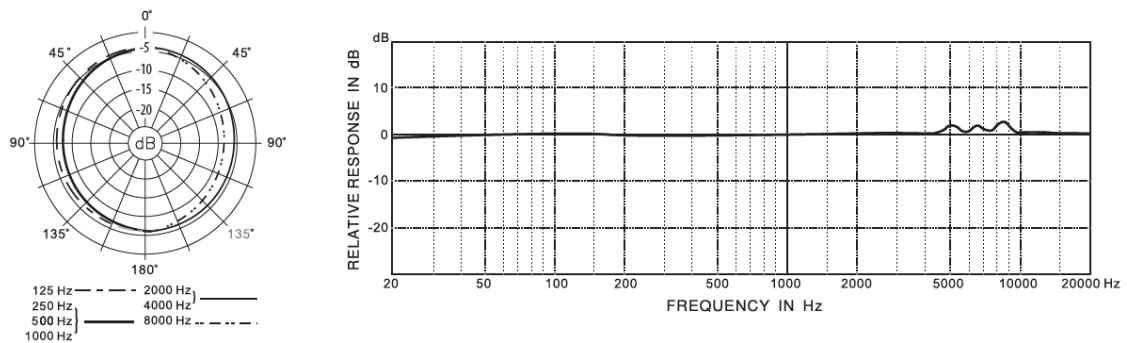
Figura G-2: Licencia de RStudio.



Fuente: propia

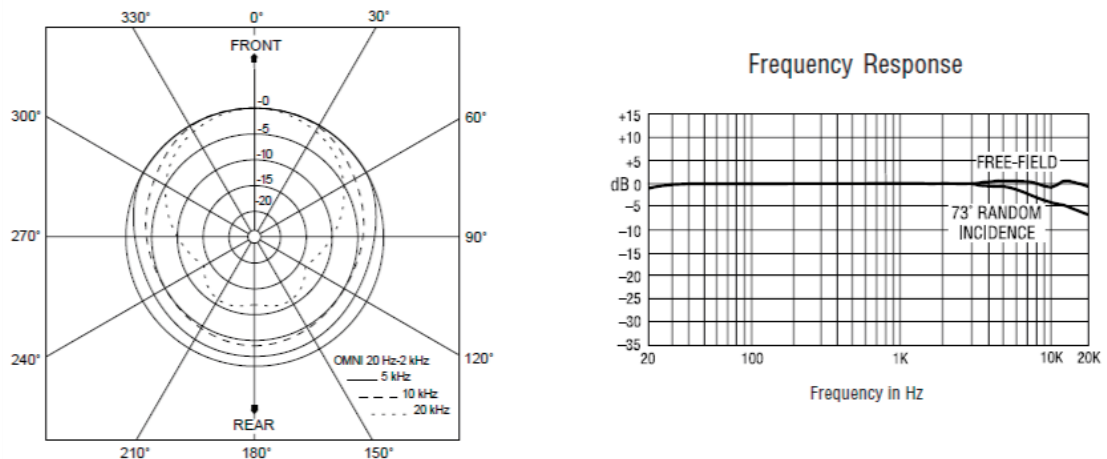
H. Anexo: hoja de datos de los micrófonos utilizados

Figura H-1: Patrón directivo y respuesta en frecuencia del micrófono Behringer ECM8000.

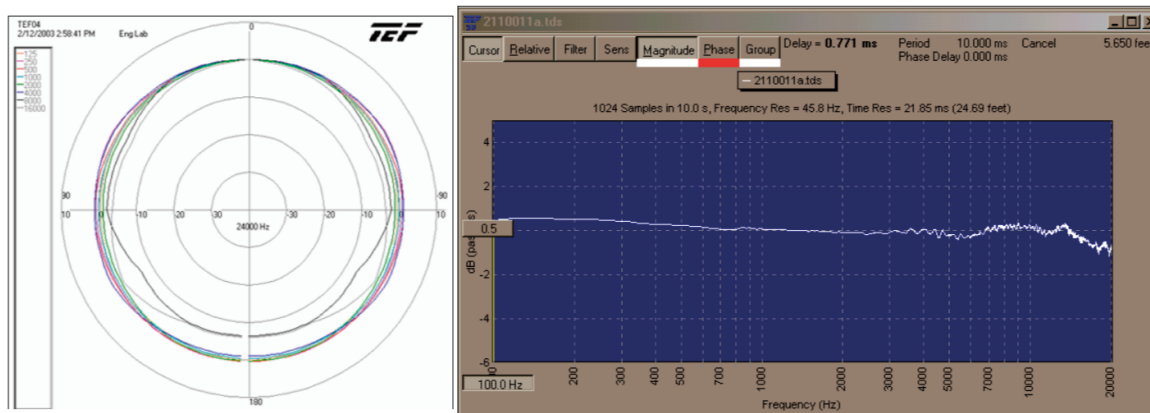


Recuperado de www.musictri.be/brand/behringer/home

Figura H-2: Patrón directivo y respuesta en frecuencia del micrófono Crown CM150.



Recuperado de www.ake.com

Figura H-3: Patrón directivo y respuesta en frecuencia del micrófono Gold Line TEF04.

Recuperado de www.gold-line.com/tef/t-tef04.htm

Tabla H-1: Especificaciones del micrófono Behringer ECM8000

Tipo	Condensador
Patrón polar	Omnidireccional
Impedancia	200 Ω
Sensibilidad	11 mV/Pa
Respuesta en frecuencia	20 – 20000 Hz

Recuperado de www.musictri.be/brand/behringer/home

Tabla H-2: Especificaciones del micrófono Crown CM150

Tipo	Condensador
Patrón polar	Omnidireccional
Impedancia	150 Ω
Sensibilidad	10.5 mV/Pa
Respuesta en frecuencia	20 – 20000 Hz

Recuperado de www.akg.com

Tabla H-3: Especificaciones del micrófono Gold Line TEF04

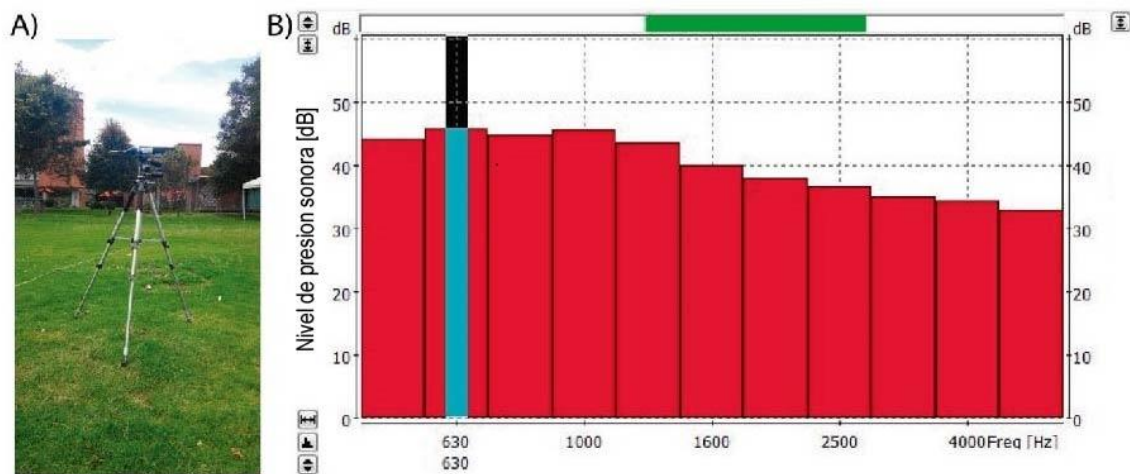
Tipo	Condensador
Patrón polar	Omnidireccional
Impedancia	20 Ω
Sensibilidad	9.1 mV/Pa
Respuesta en frecuencia	20 – 20000 Hz

Recuperado de www.gold-line.com/tef/t-tef04.htm

I. Anexo: medición del ruido de fondo y de la RF de la tarjeta de audio

En la siguiente Figura se muestra el ruido de fondo obtenido, en bandas de tercio de octava, desde 500 Hz hasta 5 kHz. El nivel de presión sonora más alto, registrado en dicho rango de frecuencias, es equivalente a 45,8 dB, en la banda con frecuencia central de 630 Hz.

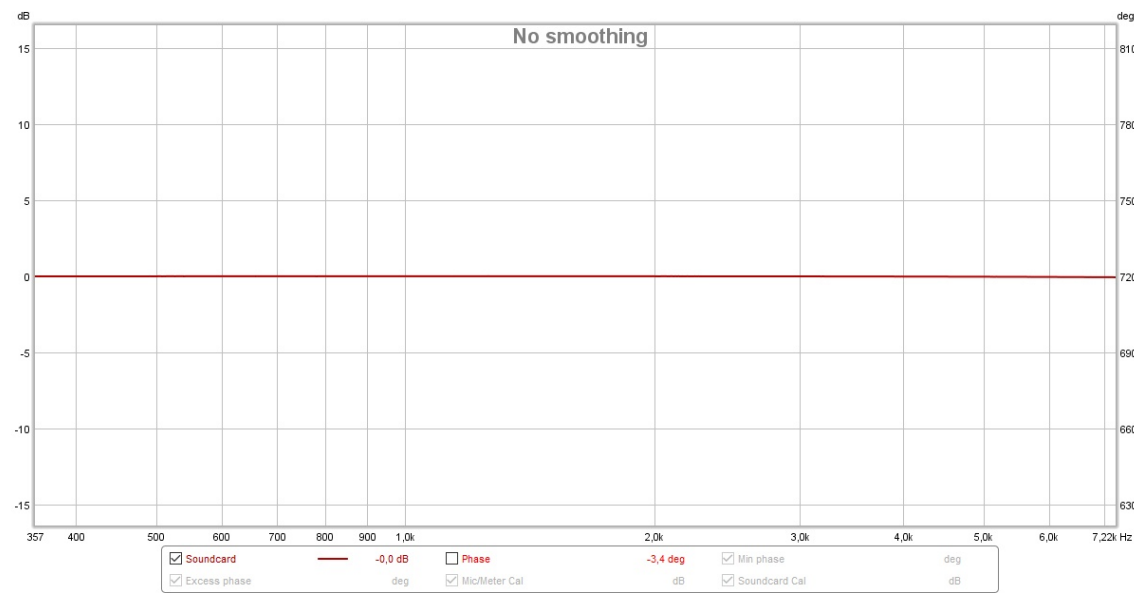
Figura I-1: Ruido de fondo registrado en el día en que se efectuaron las mediciones de la respuesta en frecuencia.



Fuente: propia

En la Figura I-2 se ilustra la medición de la RF de la tarjeta de audio, Focusrite 18i8. Es posible observar que, en el rango de frecuencias de 500 Hz a 5 kHz, esta tarjeta no presenta variaciones en su respuesta.

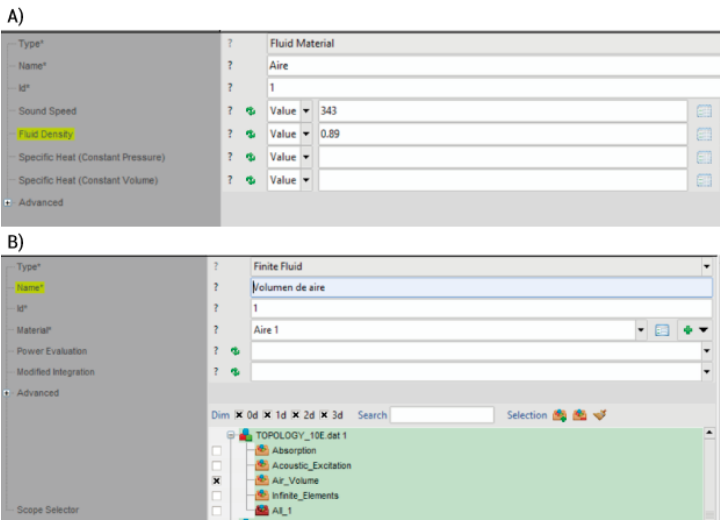
Figura I-2: Ruido de fondo registrado en el día en que se efectuaron las mediciones de la respuesta en frecuencia.



Fuente: propia

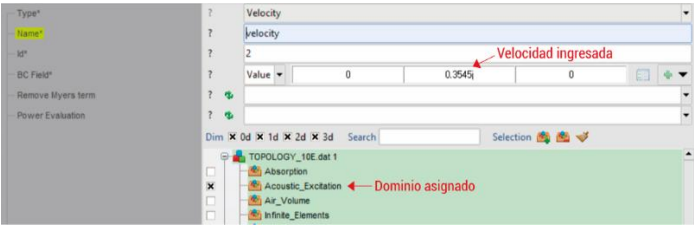
J.Anexo: manejo de la interfaz gráfica del software ACTRAN VI

Figura J-1: Definición de las propiedades del aire en el software ACTRAN VI²⁸.



Fuente: propia

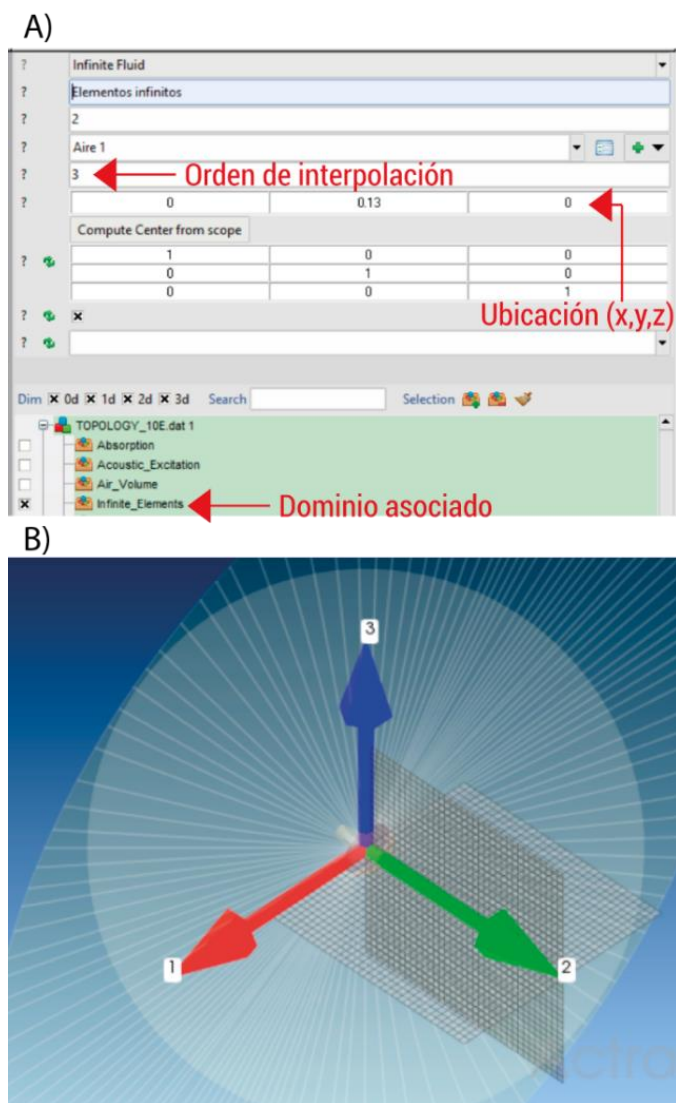
Figura J-2: Condición de velocidad designada al dominio *Acoustic_Excitation*.



Fuente: propia

²⁸ Figura A: ingreso de las propiedades del aire; fluido del sistema. Figura B: asignación del fluido al dominio *Air Volume*

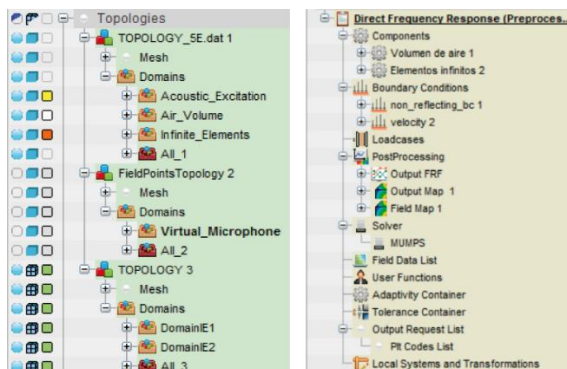
Figura J-3: Configuración del componente de los elementos infinitos en la simulación del modelo en tres dimensiones de la bocina exponencial rectangular²⁹.



Fuente: propia

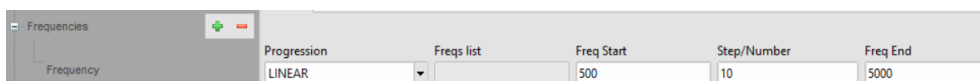
²⁹ Figura A: valores ingresados para la configuración del componente de los elementos infinitos IE. Figura B: ilustración del componente de los elementos infinitos. Las mallas estructuradas creadas en los modelos 3D están dibujados con cuadrículas de color negro.

Figura J-4: Árbol de topologías con los dominios y las herramientas del análisis utilizado en la simulación numérica³⁰.



Fuente: propia

Figura J-5: Rango de frecuencias establecido en el análisis *Direct Frequency Response*³¹.



Fuente: propia

Figura J-6: Ventana emergente que muestra el proceso de solución del problema acústico configurado en el pre-procesamiento³².



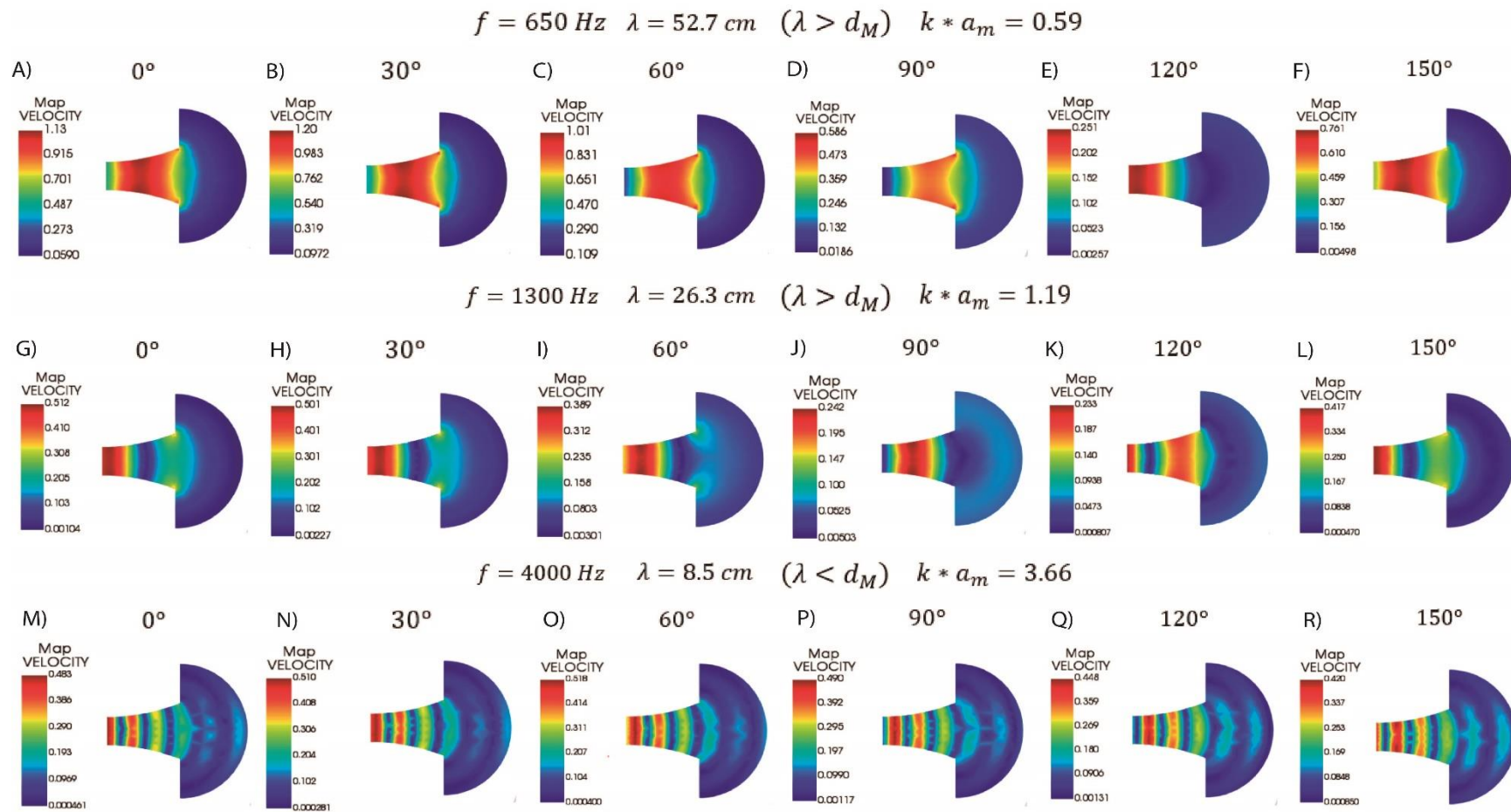
Fuente: propia

³⁰ Izquierda: dominios creados en el modelo. Derecha: herramientas del análisis *Direct Frequency Response* utilizadas en la simulación numérica

³¹ La simulación acústica se realizó desde 500 Hz hasta 5 kHz, en pasos de 10 Hz, dando un total de 451 frecuencias en las que se resolvió el problema acústico planteado en el FEM.

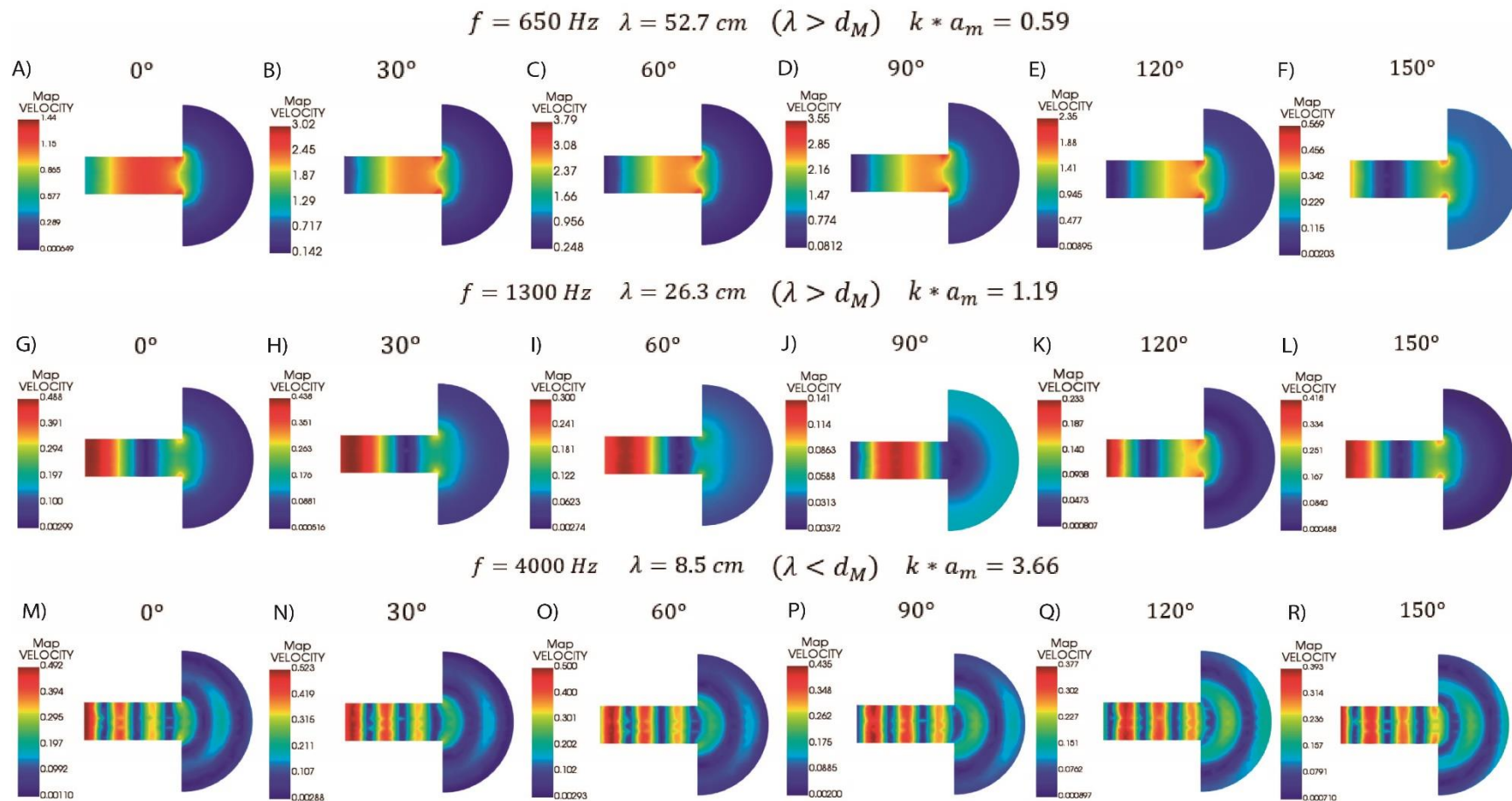
³² Solución de la matriz, en la frecuencia de 500 Hz. La memoria RAM empleada y el tiempo gastado en la solución, hasta dicha frecuencia, es de 170 MB y 15 segundos, respectivamente.

Figura J-7: Campo acústico expresado en términos de la velocidad de partícula v [m/s], en tres frecuencias (650 Hz, 1300 Hz, 4000 Hz), al interior de la bocina exponencial de Salmon.



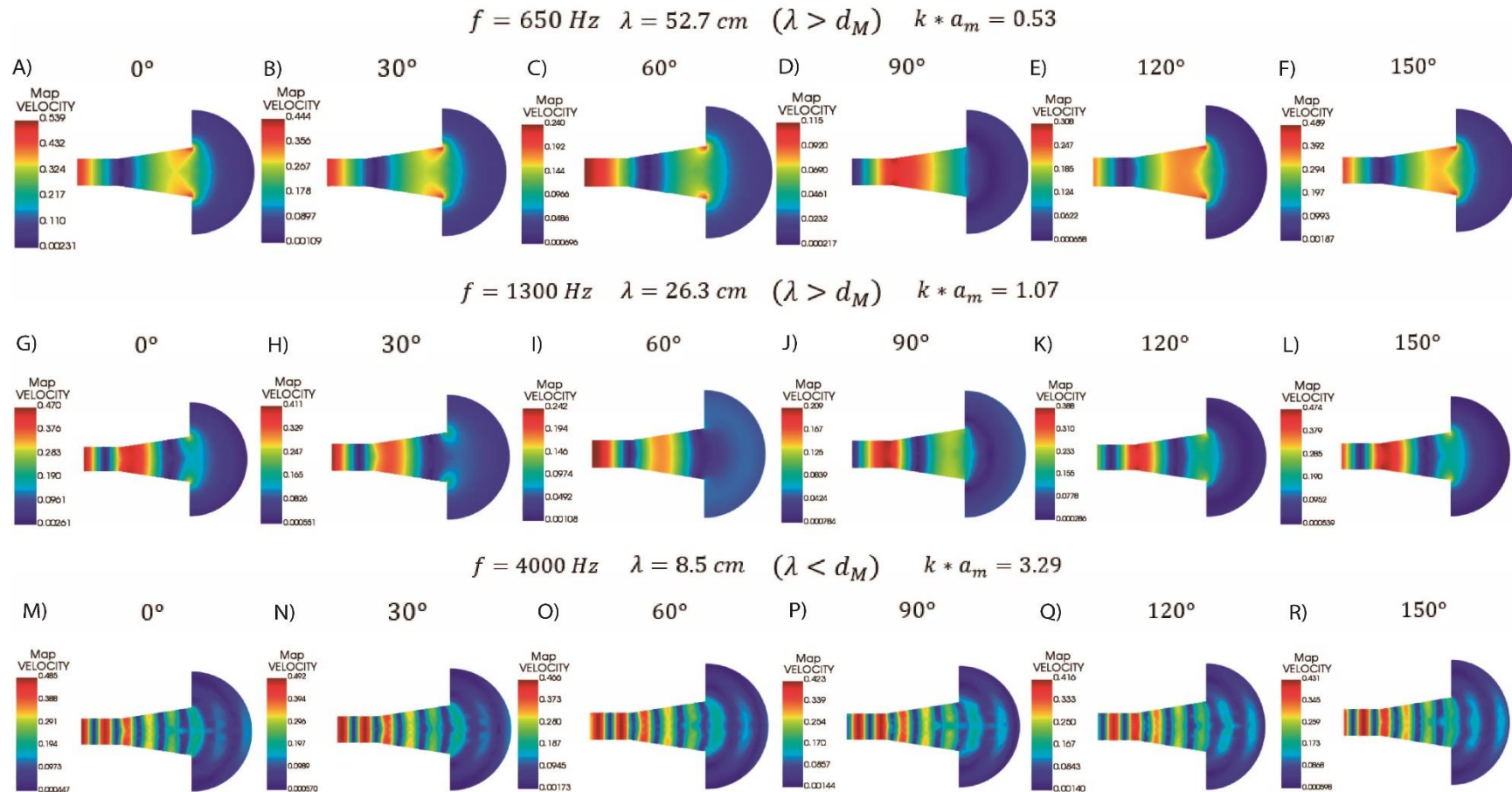
Fuente: propia

Figura J-8: Campo acústico expresado en términos de la velocidad de partícula v [m/s], en tres frecuencias (650 Hz, 1300 Hz, 4000 Hz), al interior de la bocina exponencial rectangular.



Fuente: propia

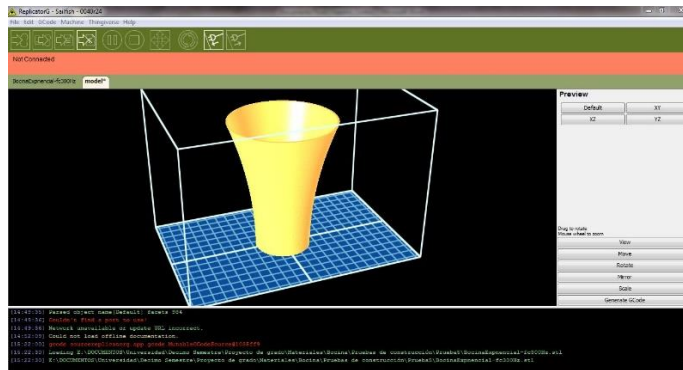
Figura J-9: Campo acústico expresado en términos de la velocidad de partícula v [m/s], en tres frecuencias (650 Hz, 1300 Hz, 4000 Hz), al interior de la bocina cónica.



Fuente: propia

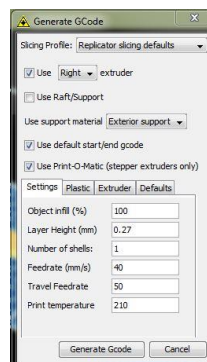
K. Anexo: configuración del software REPLICATOR G y proceso de la impresión 3D

Figura K-1: Ventana principal del software *Replicator G*³³.



Fuente: propia

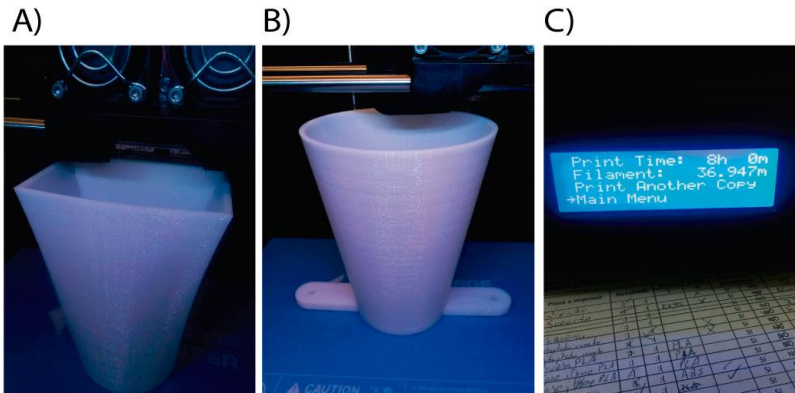
Figura K-2: Parámetros ingresados para la configuración de la impresión en *Replicator G*.



Fuente: propia

³³ Arriba: menú para importar los archivos .STL y generar el código en *Python*. Izquierda: ventana de visualización del modelo importado. Derecha: menú para mover y rotar los modelos importados.

Figura K-3: Proceso de impresión en 3D de las bocinas al interior del dispositivo *Creator Pro*.



Fuente: propia

Tabla K-1 Tiempo y filamento empleado en la impresión de las bocinas.

Bocina	Tiempo	Filamento
Cónica	8.81 horas	43.86 metros
Exponencial rectangular	6.61 horas	30.26 metros
Exponencial de Salmon	8 horas	36.95 metros

Fuente: propia

Referencias

Abdi, H. Williams, L. (2010). Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) Test. Texas: Encyclopedia of Research Design.

Acosta, O. E. (2015). *Análise numérica do campo acústico associado a entrada de motores turbofan para diferentes configurações de tratamento acústico*. (Tesis de maestría). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Asmar, I. (1999). *Métodos numéricos: Un primer curso*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Backman, J. (1998). *A Non-Linear Model of a Small Transducer*. UK 13th Conference: Microphones & Loudspeakers.

Ballantine, S. (1927). *On the Propagation of Sound in the General Bessel Horn of Infinite Length*. Journal of the Franklin Institute, 203(1), 85 – 102.

Ballou, G. (2008). *Handbook for sound engineers*. Oxford: Elsevier.

Barron, R. (2001). *Industrial Noise Control and Acoustics*. New York: Marcel Decker, Inc.

Beranek, L. (1954). *Acoustics*. New York: McGraw Hill Book.

Brydson, J. (1999). *Plastic Materials*. United States: Heinemann.

Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Madrid: Edicions UPS.

Cox, C. D'Antonio, P. (2004). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, design and application*. New York: Spon Press.

Davis, G. Jones, R. (1989). *The Sound Reinforcement Handbook*. Milwaukee: Hal Leonard Publishing Corporation.

Dinsdale, J. (1974). *Horn loudspeaker design – 2: Continuing the development of design theories and techniques*. Wireless World.

Eargle, J. Gander, M. (2004). *Historical Perspectives and Technology Overview of Loudspeakers for Sound Reinforcement*. Journal of the Audio Engineering Society, 52(4), 412 – 432.

Freehafer, J. (1940). *An Acoustical Impedance of an Infinite Hyperbolic Horn*. Journal of the Acoustic Society of America, 11, 467 – 476.

Free Field Technologies SA. (2014). *ACTRAN 15 User's Guide – Volume 1: Installation, Operations, Theory and Utilities*. Belgium: Free Field Technologies SA.

García, A. Ruíz, J. (2013). *Estudio de la Atenuación Sonora en Silenciadores de Cámara de Expansión con y sin Paredes Absorbentes, Usando los Métodos FEM y TMM*. Métodos numéricos y sus aplicaciones en Diferentes Áreas. Cali: Universidad Autónoma de Occidente.

Geaves, G. Henwood, D. (1996). *Horn Optimisation using Numerical Methods*. Presented at the 100th Convention of Audio Engineering Society (preprint no. 4208).

Geedes, E. (1989). *Acoustic Waveguide Theory*. Journal of the Audio Engineering Society, 37(7,8), 554 – 569.

González, H., & Weston, C. (2014). *Métodos numéricos aplicados a la Ingeniería: Casos de estudio usando Matlab*. Chile: Ediciones UC.

Green, I. Maxfield, J. (1977). *Public Address System*. Journal of the Audio Engineering Society, 25(4), 184-195.

Gutiérrez, H. De la Vara, Román. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: MacGraw-Hill.

Hamilton, L. (1990). *Modern Data Analysis. A First Course in Applied Statistics*. Belmont: Wadsworth Publishing Company.

Henwood, D. Jones, C. Fryer, P. Worthington, M. (1987). *Finite element modeling of loudspeaker diaphragms and the boundary element method for evaluating sound pressure*. Presented at the 82nd convention of Audio Engineering Society (preprint. no. 2449).

Holland, K. (2003). *Horn Loudspeakers For Live Sound*. Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, UK. AES 18TH UK Conference.

Holland, K. Fahy, J. Morfey, L. (1991). *Prediction and Measurement of the One Parameter Behavior of Horns*. Journal of the Audio Engineering Society, 39(5), 315 – 337.

Hernández, R. Fernández, C. Baptista, P. (2010). *Metodología de la investigación*. México: MacGraw-Hill.

Jolliffe, I. (2002). *Principal Component Analysis*. Springer. Ed. 4nd.

Keele, D. (1973). *Optimum Horn Mouth Size*. Presented at the 46st convention of Audio Engineering Society (preprint no. 933).

Keele, D. (1975). *What's So Sacred About Exponential Horns?*. Presented at the 51st convention, of Audio Engineering Society (preprint no. 1038).

Kinsler, L. Frey, A. Coppens, A. Sander, J. (1950). *Fundamentals of Acoustics*. Ed. 4th. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Kirkup, S. (2007). *The Boundary Element Method in Acoustics*. Integrated Sound Software.

Klippel, W. (2003). *Active Compensations of Transducer Nonlinearities*. AES 23rd International Conference, Copenhagen, Denmark.

Kolbrek, B. (2008). *Horn Theory: An Introduction, Part 1*. Audio Express.

Kuttruff, H. (2009). *Room Acoustics*. New York: Spon Press.

Kyouno, N. Sakai, S. Morita, S. (1982). *Acoustic radiation of a horn loudspeaker by the finite element methods – acoustic characteristics of a horn loudspeaker with an elastic diaphragm*. Journal of the Audio Engineering Society, 30(12), 896 – 905.

Lazar, J. Heidi, J. Hochheiser, J. (2017). *Research Methods in Human – Computer Interaction*. Cambridge: Elsevier.

Marburg, S. Nolte, B. (Eds.). (2008). *Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-3-540-77448-8

Mommertz, E. (1995). *Angle-dependent in situ measurements of reflection coefficients using a subtraction technique*. Applied Acoustics. 46(3), 251- 263.

Morita, S. Kyono, N. Sakai, S. Yamabuchi, T. Kagawa, Y. (1979). *Acoustic radiation of a horn loudspeaker by the finite element method – A consideration of the acoustic characteristic of horns*. Journal of the Audio Engineering Society, 28(7/8), 482 – 489.

Mustafi, P. (2013). *Improved Turbofan Intake Liner Design and Optimization*. (Tesis doctoral). University of Southampton, United Kingdom.

Olson, H. (1957). *Elements of Acoustical Engineering*. Princeton: D. van Nostrand.

Osorio, R. (2007). *Métodos numéricos en química con Matlab*. Medellín: Universidad de Antioquia.

-
- Posada, G. (2016). Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos. Medellín: Fundación Universitaria Luis Amigó. ISBN: 978-958-8943-05-3
- Pueo, B. Romá, M. (2003). *Electroacústica: Altavoces y Micrófonos*. Madrid: Pearson Education.
- Putland, G. (1993). *Every One-parameter Acoustic field Obeys Webster's Horn Equation*. Journal of the Audio Engineering Society, 41(9), 435 – 451.
- Salmon, V. (1946). *A New Family of Horns*. The Journal of Acoustical Society of America. 17(3), 212.
- Rugh, W. (1981). *Nonlinear System Theory, The Volterra/Wiener Approach*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Webster, A. (1919). *Acoustical Impedance and the Theory of Horns and of the Phonograph*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 5(7), 275 – 282.
- Zienkiewicz, O. Taylor, R. (2000). *The finite element method, Volume 1: the basis*. Barcelona: Butterworth-Heinemann.